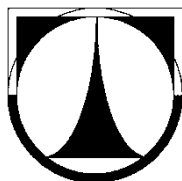


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra vozidel a motorů



Obor 2302R022

Stroje a zařízení

Zaměření

Dopravní stroje a zařízení

**TERMOGRAFIE NA STANOVIŠTI PÍSTOVÝCH
SPALOVACÍCH MOTORŮ**

**THERMOGRAPHY IN LABORATORIES OF PISTON
COMBUSTION ENGINES**

Bakalářská práce

Tomáš Hrbek

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jan Novák, Ph.D.

Konzultant diplomové práce: doc. Dr. Ing. Pavel Němeček

Počet stran: 56

Počet obrázků: 24

Počet příloh: 1

Květen 2014

Místo pro vložení originálního zadání DP (BP)

Prohlášení k využívání výsledků bakalářské práce

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V dne

.....

podpis

Termografie na stanovišti pístových spalovacích motorů

Anotace

Tato práce se zabývá problematikou využití termografie v laboratořích KVM. V její první části přibližuji členění teplotních dotykových i bezdotykových měřidel, dále se zabývám teoretickými principy, na jejichž základě infračervené termografické kamery fungují, pak také konstrukcí IČ detektorů a vlivy ovlivňujícími přesnost měření. Také jsem popsal pístový spalovací motor z hlediska tepelného stroje. V poslední části této práce jsem vyhodnocoval a porovnával pořízené termogramy zvolených částí pístového spalovacího motoru a snažil jsem se určit emisivitu měřených objektů pro přesnější výpočty. Pro porovnání mi posloužil výpočtový program, který vypočítává reálné teploty bodů zadaného pole, jeho vytvoření bylo také součástí této bakalářské práce a je její přílohou.

Klíčová slova: Termografie, IČT kamera, emisivita, pístový spalovací motor

Thermography in laboratories of piston combustion engines

Annotation

This thesis deals with the usage of thermography in laboratories of Department of Vehicles and Engines. In the first part of thesis, I describe division of temperature contact and also contactless test gear. The thesis also deals with theoretical principles on the basis of infrared thermographic cameras work, then with structure of IR detectors and influences that affect measurement accuracy. I also described piston combustion engine in terms of a thermal machine. In the last part of this thesis, I evaluated and compared measured thermograms of selected parts of piston combustion engine and I tried to determine emissivity of the measured objects for accurate calculations. Computing programme helped me in comparing. This programme calculates real temperatures of spots in specified field. Its creation was also part of this bachelor thesis and you could find it in the attachment.

Key words: thermography, IRT camera, emissivity, piston combustion engine

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Janu Novákovi, Ph.D. za cenné a užitečné rady při zpracování této práce a také za poskytnutí důležitých informací a pomoc při měření v laboratořích KVM. Dále děkuji panu Ing. Antonínu Skarolkovi, Ph.D. za velmi cenné rady a pomoc při vytváření přepočtového programu.

Seznam vzorců

3.1	výpočet energie kvanta záření	23
3.2	výpočet celkové intenzity vyzařování o teplotě T na vlnové délce λ	23
3.3	výpočet intenzity vyzařování	24
3.4	výpočet vlnové délky	25
3.5	první Kirchhoffův zákon	26
3.6	druhý Kirchhoffův zákon	26
5.1	výpočet emisivity povrchu	34
5.2	výpočet celkového zářivého toku	37
7.1	výpočet reálné teploty objektu	45

Seznam obrázků

Obrázek 2.1: Mezinárodní teplotní stupnice z roku 1990 (ITS-90)	14
Obrázek 2.2: Různé druhy dilatačních teploměrů	16
Obrázek 2.3: Příklady elektrických teploměrů	17
Obrázek 2.4: Příklad pyrometru	18
Obrázek 3.1: Celé elektromagnetické spektrum [12]	22
Obrázek 3.2: Propustnost atmosféry v oblasti IČ záření [5]	23
Obrázek 3.3: Spektrální hustota zářivého toku dokonale černého tělesa [10]	24
Obrázek 3.4: Zobrazení Stefan – Boltzmannova zákona [13]	25
Obrázek 3.5: Zobrazení Wienova posunovacího zákona [11]	26
Obrázek 3.6: Kirchhoffův zákon termální radiace [6]	27
Obrázek 4.1: Blokové schéma digitální IČT kamery [15]	28
Obrázek 4.2: Detail mikrobolometru [15]	31
Obrázek 4.3: Maticové pole mikrobolometrů [15]	31
Obrázek 5.1: Charakteristické vyzařování při různých emisivitách [19]	35
Obrázek 5.2: Vliv prostupnosti atmosféry a záření okolního prostředí [20]	36
Obrázek 5.3: Znázornění zaměřené velikosti snímané plochy [19]	38
Obrázek 5.4: Optický diagram infračerveného čidla [19]	38
Obrázek 6.1: Sabatův, Seiligerův cyklus v p-V diagramu	40
Obrázek 6.2: Skutečný pracovní oběh v p-V diagramu	42
Obrázek 7.1: Fotografie části hlavy motoru s použitým speciálním nástřikem	46
Obrázek 7.2: Termogram s reálnými hodnotami	47
Obrázek 7.3: Termogram s nástřikem speciální barvy	47
Obrázek 7.4: Výfukové potrubí za katalyzátorem	48
Obrázek 7.5: Termogram výfukového potrubí	48

Seznam tabulek

Tabulka 3.1: Rozdělení elektromagnetického záření [7]	22
Tabulka 5.1: základní rozdělení těles podle jejich emisivity	35
Tabulka 5.2: hodnoty emisivity běžných materiálů [17]	36
Tabulka 7.1: Parametry měřicí techniky IČT FLIR T335 [25]	43
Tabulka 7.2: Nastavené hodnoty na IČT kameře	43
Tabulka 7.3: Reálné hodnoty při měření	45

Seznam symbolů a jednotek

Q	zářivá energir	[J]
Φ	zářivý tok	[W]
M	intenzita vyzařování	[Wm ⁻²]
M_λ	spektrální hustota intenzity vyzařování	[Wm ⁻³]
I	zářivost	[Wsr ⁻¹]
L	zář	[Wsr ⁻¹ m ⁻²]
S	obsah	[m ²]
t	čas	[s]
λ	vlnová délka	[m]
Ω	prostorový úhel	[sr]
L_λ	spektrální hustota záře	[Wsr ⁻¹ m ⁻³]
E	intenzita ozáření	[Wm ⁻²]
h	Planckova konstanta	[Js]
f	frekvance	[Hz]
T	teplota	[K]
c	rychlost	[ms ⁻¹]
k	Bolzmannova konstanta	[JK ⁻¹]
σ	Stefan – Boltzmannova konstanta	[Wm ⁻² K ⁻⁴]
b	Wienova konstanta	[mK]
α_λ	spektrální absorpce	[-]
ρ_λ	spektrální reflektance	[-]
τ_λ	spektrální propustnost	[-]
ε_λ	spektrální emisivita	[-]
K	integrální citlivost	[VW ⁻¹]
U	napětí	[V]
K_λ	spektrální citlivost	[VW ⁻¹]
S_λ	relativní spektrální citlivost	[-]
NEP	výkonový ekvivalent	[WHz ^{-$\frac{1}{2}$}]
D	detektivita	[W ⁻¹ Hz ^{$\frac{1}{2}$}]
D*	normovaná detektivita	[W ⁻¹ mHz ^{$\frac{1}{2}$}]
τ	propustnost atmosféry	[-]

Obsah

1	Úvod	12
2	Způsoby měření teploty	13
2.1	Teplota.....	13
2.1.1	Nultá věta termodynamická	13
2.1.2	Teplotní stupnice.....	13
2.2	Rozdělení teploměrů	14
2.2.1	Teploměry dilatační	15
2.2.2	Teploměry elektrické	16
2.2.3	Teploměry optické	17
2.2.4	Speciální teploměry	18
3	Teorie termografie	20
3.1	Základní veličiny a pojmy.....	20
3.2	Tepelné záření	21
3.3	Atmosférická okna	22
3.4	Planckův zákon	23
3.5	Stefan - Boltzmannův zákon	24
3.6	Wienův posunovací zákon	25
3.7	Kirchhoffův zákon termální radiace.....	26
4	Konstrukce IČ termografické kamery	28
4.1	Optický systém.....	28
4.2	Detektor IČ záření	29
4.2.1	Základní parametry IČ detektorů	29
4.2.2	Rozdělení detektorů	29
5	Vlivy na přesnost měření	34
5.1	Emisivita	34
5.1.1	Příklady hodnoty emisivity různých materiálů	35
5.2	Vlivy okolí	36
5.2.1	Atmosféra.....	37
5.2.2	Odražená zdánlivá teplota.....	37
5.3	Vzdálenost mezi objektem a kamerou	38
6	Pístový spalovací motor jako tepelný stroj.....	39
6.1	Teorie pracovních oběhů PSM.....	39

6.1.1	Ideální pracovní oběh PSM.....	39
6.1.2	Skutečný pracovní oběh PSM.....	41
7	Měření.....	43
7.1	Seznámení se s měřicí technikou a vyhodnocovacím zařízením	43
7.1.1	Měřicí technika	43
7.1.2	Výpočtová a vyhodnocovací zařízení	44
7.1.3	Výpočtový program v Microsoft Excel	44
7.1.4	Určení emisivity povrchu.....	45
7.2	Postup měření.....	46
7.3	Porovnání termogramů.....	47
7.4	Zhodnocení měření.....	50
8	Závěr.....	51
	Literatura.....	52
	Přílohy.....	55

1 Úvod

V této práci se budu zabývat popisem a rozdělením měřících dotykových i bezdotykových měřidel teploty založených na různých principech měření. Dále popisem fyzikálních zákonů, na jejichž principech termografie funguje a také popisem konstrukce termokamery. Také popíši činnost pístového spalovacího motoru z hlediska tepelného stroje. V poslední části této práce se zaměřím na zhodnocení pořízených termografických snímků v laboratořích KVM.

Cílem této bakalářské práce je zmapování možností a využitelnosti termografie v laboratořích Katedry vozidel a motorů s pístovými spalovacími motory. Součástí této práce bude vytvoření výpočtového programu sloužícího pro přepočet tepelného pole na skutečné teploty.

2 Způsoby měření teploty

2.1 Teplota

Teplota je stavová veličina charakterizující termodynamický stav jakékoliv makroskopické soustavy.[21]

2.1.1 Nultá věta termodynamická

Nultá věta termodynamická říká, že každý termodynamický systém (těleso) dospěje po určité době do stavu termodynamické rovnováhy, který je jednoznačně určen jediným parametrem – teplotou. Z toho plyne, že jsou-li termodynamické systémy navzájem v termodynamické rovnováze, pak tyto systémy mají stejnou teplotu.[22]

Teplota je intenzivní stavová veličina, tj. nezávisí na velikosti systému. Teplota patří k několika málo veličinám, které nelze měřit přímo, ale měří se pomocí jiných fyzikálních veličin jako např. objemová a délková teplotní roztažnost látek, změna elektrického odporu kovů nebo polovodičů, vznik kontaktního napětí a další. [22]

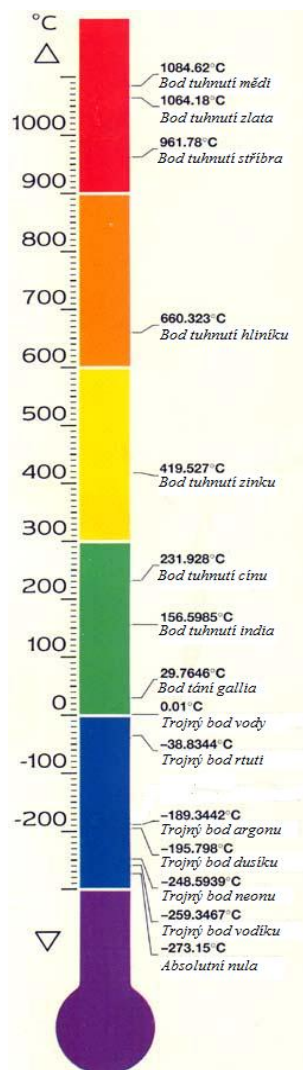
2.1.2 Teplotní stupnice

Teplotní stupnice je posloupnost číselných hodnot teploty přiřazených různým stavům zvolené soustavy, tělesa, popř. látky. Je zpravidla určena na základě závislosti zvolené stavové veličiny na teplotě (empirická teplotní stupnice). Součástí každé teplotní stupnice jsou její základní body neboli pevné body. Každý z nich je určen hodnotou teploty přiřazenou zvolenému rovnovážnému stavu mezi fázemi vhodné chemicky čisté látky. [21]

Mezinárodní teplotní stupnice z roku 1990 (mezinárodní zkratka ITS-90)

Je teplotní stupnice přijatá mezinárodně pro praktická měření teploty od 0,65K až do nejvyšších teplot prakticky měřitelných na základě Planckova zákona vyzařování. Je založena na 14 pevných bodech, jimiž jsou hodnoty teplot zvolených rovnovážných stavů stanovené v mezích dosažitelné přesnosti ve shodě s hodnotami jejich termodynamické teploty. Těmito stavy jsou trojné body a rovnovážné stavy mezi pevnou a kapalnou fází určitých látek při stanoveném tlaku.

Ostatní hodnoty teploty se určují na základě předepsaných interpolačních postupů pomocí určených měřících přístrojů (teploměrů). [21]



Obrázek 2.1: Mezinárodní teplotní stupnice z roku 1990 (ITS-90)

2.2 Rozdělení teploměrů

Přístroje pro měření teploty (teploměry), využívají různé měřicí principy a existují v mnoha konstrukčních variantách. Dělit je můžeme dle různých hledisek např.:

- Dle umístění snímací části v měřeném prostředí na *dotykové* a *bezdotykové*.
- Dle fyzikálního principu na *dilatační*, *elektrické*, *speciální* a *optické*.
- Dle použití teploměrné látky na *kapalinové*, *kovové*, *polovodičové* a *plynové*.
- Další dělení je například: podle teplotního rozsahu, dle konstrukčního řešení, dle použitého materiálu na vlastní čidlo atd.

2.2.1 Teploměry dilatační

Dilatační teploměry jsou založené na principu roztažnosti látek, nejčastěji kapalin nebo kovů, vlivem změny teploty. Teplotní dilatace se projevuje změnou délky, objemu nebo tlaku použité látky. Tato skupina teploměrů se dle použití teploměrné látky dále dělí na *kapalinové*, *tlakové* a *plynové*. [23]

Teploměry kapalinové

Tyto teploměry využívají objemové roztažnosti kapalin. Rozdělovat se mohou nejen podle použité teploměrné kapaliny, ale i podle konstrukčního řešení a fyzikálních principů, kterých využívají teploměry *skleněné*, *tlakové* a *parní*. [23]

Skleněné teploměry - Nejrozšířenější kapalinové teploměry, které se skládají z nádoby (jímky) naplněné teploměrnou kapalinou, která se změnou teploty roztahuje do kapiláry o malém průměru, čímž dochází ke zvýraznění závislosti a dobře rozlišitelnosti teploty na lineární stupnici. [23]

Tlakové teploměry - Tato skupina teploměrů je tvořena jímkou a kapilárou, které jsou zcela zaplněny teploměrnou kapalinou (rtuť, líh, petrolej, xylol,...). Změna teploty se projevuje změnou v tlaku v teploměrném systému a ta je měřena deformačním manometrem. [23]

Parní teploměry - Využívají také změny tlaku. Jsou přesnější a citlivější jak tlakové teploměry a liší se také v tom, že mají jímku vyplněnou kapalinou jen částečně. Teploměrnou látku tvoří lehce odpařitelné látky, přičemž sytá pára vyplňuje zbytek jímky a kapiláru až po deformační manometr. Vhodnou náplní je např. toluol, benzen, aceton, líh, propan, butan, metylchlorid atd. [23]

Teploměry kovové

Tyto teploměry využívají délkové teplotní roztažnosti kovů. Dělíme se dále podle konstrukce na *tyčové* a *bimetalové*.

Tyčové teploměry – Skládají se z jímky (pouzdra) a tyče. Jejich materiály mají rozdílný součinitel délkové teplotní roztažnosti. Při změně teploty se tyč prodlouží o hodnotu y_1 zatímco jímka o hodnotu y_2 . Koncové body se tedy vzájemně vůči sobě posunou o hodnotu Δy . [23]

Bimetalové teploměry - Základem je bimetal (dvojkov) vyrobený z pevně spojených pásů dvou kovů o nestejně roztažnosti po celé délce. V technické praxi se využívá výraznějších závislostí, které dávají tvar šroubovice nebo spirály, jako

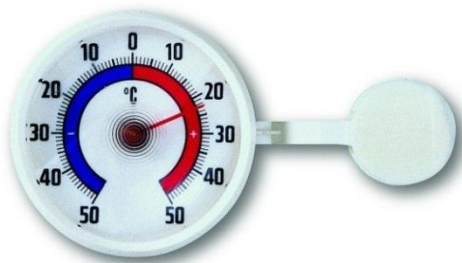
kombinace materiálů se používají např. invar - mosaz, invar - nikl, invar - ocel, ocel - feronikl aj. Použití těchto senzorů je do $+400^{\circ}\text{C}$. Výhodou bimetalových teploměrů je jejich jednoduchost a použitelnost v regulační technice. [23]

Teploměry plynové

Plynové teploměry jsou principiálně shodné s teploměry tlakovými. Jejich náplní je nejčastěji inertní plyn jako dusík, hélium, neon apod. Teploměry využívají buď objemové roztažnosti, a nebo pracují s konstantním objemem s využitím stavové rovnice. Výhodou plynových teploměrů je použitelnost až do oblasti teplot blízkých absolutní teplotní nule. [23]



a)



b)



c)

Obrázek 2.2: Různé druhy dilatačních teploměrů, a) kapalinový rtuťový teploměr, b) bimetalový teploměr, c) plynový teploměr

2.2.2 Teploměry elektrické

Mezi elektrické teploměry řadíme ty, které pro měření teplot využívají přesné definice teplotní závislosti některé elektrické veličiny na teplotě. Patří sem především teploměry *odporové* (využívající teplotní změny odporu) a *termočlánky* (teploměry využívající termoelektrického jevu). [23]

Teploměry odporové

Principem odporových teploměrů je teplotní závislost odporu na teplotě. Tyto teploměry dnes patří k základním a dokonce i etalonovým měřidlům v rozsahu -259°C až $+961^{\circ}\text{C}$ (rozmezí mezi trojným bodem vodíku a bodem tuhnutí stříbra). Tyto teploměry se dále dělí na *kovové polovodičové, polykrystalické a monokrystalické*. [23]

Teploměry termoelektrické

Termoelektrický teploměr (termočlánek) je elektrický teploměr, využívající vzniku termoelektrického napětí vlivem teploty. Využívá ke své činnosti tzv. Seebeckův jev. Jestliže spojíme vodivě dráty dvou různých kovů do uzavřeného obvodu a oba spoje umístíme do prostředí o rozdílných teplotách pak citlivý milivoltmetr v obvodu zaznamená výchylku. [23]



Obrázek 2.3: Příklady elektrických teploměrů, a) odporový teploměr, b) termoelektrický teploměr

2.2.3 Teploměry optické

Tuto skupinu teploměrů představují bezdotykové teploměry, známější pod názvem pyrometry. Výhodami bezdotykového měření teplot je především zanedbatelný vliv měřicí techniky na měřený objekt, možnost měření rotujících nebo pohybujících se těles, možnost měření rychlých teplotních změn, možnost snímání a zobrazování celého povrchu měřeného tělesa. Podle způsobu měření dělíme pyrometry na *radiační, jasové, barvové a pásmové*. Pyrometry využívají Stefan - Boltzmanova zákona (viz kapitola 3.5). [23]



Obrázek 2.4: Příklad pyrometru

2.2.4 Speciální teploměry

Termovize

Využívají vyzařování objektů v infračervené oblasti spektra. Povrch objektu je sledován speciální kamerou s detektorem infračerveného záření. Teplotní pole se zobrazuje jako termogram v různých barevných odstínech, nebo v odstínech šedé barvy.

Termovize je náplní této bakalářské práce, tudíž fyzikálními zákony, konstrukcí a problematikou se zabývám v dalších kapitolách této práce.

Teploměr krystalový

Jedná se o tekuté krystaly na bázi cholesterických mezofází derivátů cholesterolu. Je to teploměr, jehož měrný element tvoří výbrus monokrystalu piezokrystalového rezonátoru. Krystalový výbrus je závislý na teplotě (s teplotou mění rezonanční kmitočet). Využití tohoto jevu spočívá ve srovnávání měřicího a referenčního kmitočtu, přičemž se dosahuje citlivosti až 0,001 °C. [23]

Teploměr akustický

Akustické teploměry jsou založeny na teplotní změně rychlosti zvuku v ideálním plynu. Uplatňují se zejména v metrologii. [23]

Teploměr šumový

Tyto teploměry jsou založeny na generování šumového napětí náhodným pohybem elektronů v odporu. Šumové teploměry se používají zejména pro měření velmi nízkých teplot. [23]

Tekuté krystaly

Využívají teplotně závislé molekulární orientace, která způsobuje při osvětlení bílým světlem barevné interferenční jevy. [23]

3 Teorie termografie

3.1 Základní veličiny a pojmy

Energie záření pocházející z tělesa (tepelný sálavý tok) je určena jako:

zářivá energie $Q = \int_0^t \Phi \cdot dt$ [J] energie, kterou do svého okolí vyzařuje zdroj záření. Je definovaná jako časový integrál zářivého toku [4];

zářivý tok (zářivý výkon) $\Phi = \frac{d\Phi}{dt}$ [W] výkon přenášený zářením (vysílaný nebo přijímaný) [4];

intenzita vyzařování $M = \frac{d\Phi}{dS}$ [W·m⁻²] podíl zářivého toku vycházejícího z elementu povrchu a plochy tohoto povrchu [4];

spektrální (monochromatická) hustota intenzity vyzařování $M_\lambda = \frac{dM}{d\lambda}$ [W·m⁻³] podíl intenzity vyzařování v malém intervalu vlnových délek a tohoto intervalu [4];

zářivost $I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$ [W·sr⁻¹] podíl zářivého toku vycházejícího ze zdroje nebo jeho elementu do elementárního prostorového úhlu a tohoto prostorového úhlu [4];

zář (intenzita záření) $L = \frac{dI}{dS \cdot \cos\varphi}$ [W·sr⁻¹·m⁻²] podíl zářivosti elementu povrchu a plochy kolmého průmětu tohoto elementu do roviny kolmé k danému směru [4];

spektrální (monochromatická) hustota záře $L_\lambda = \frac{dL}{d\lambda}$ [W·sr⁻¹·m⁻³] podíl záře v malém intervalu vlnových délek a tohoto intervalu [4];

intenzita ozáření $E = \frac{d\Phi}{dS}$ [W·m⁻²] podíl zářivého toku dopadající na elementu povrchu a plochy tohoto povrchu [4];

poloprostor: každá rovina rozděluje prostor na dvě opačné části (poloprostory) nad a pod rovinou. Často se zobrazuje jako polokoule. Je možné ho vyjádřit jako prostorový úhel 2π sr. [8];

černé těleso: je to ideální těleso, které pohlcuje veškeré záření všech vlnových délek, dopadající na jeho povrch. Je současně ideální zářič, ze všech možných těles o stejné teplotě vysílá největší možné množství zářivé energie. Celkové množství energie, které se vyzáří z povrchu černého tělesa za jednotku času a rozložení intenzity záření

podle vlnových délek závisí jen na jeho teplotě (podle Kirchhoffova zákona) [9]. Jeho odrazivost a propustnost je nulová. Zář černého tělesa je ve všech směrech v poloprostoru nad zářičem konstantní. Pro černé těleso jsou odvozeny fyzikální zákony (Planckův, Wienův a Stefan - Boltzmannův), které jsou popsány níže. Dále o černém tělesu v kapitole 5.1.

3.2 Tepelné záření

Každé těleso s teplotou vyšší než 0 K vyzařuje do okolí elektromagnetické záření na různých vlnových délkách. Část záření, které vzniká tepelným pohybem částic pevných těles, kapalin nebo i plynů a plazmy nazýváme „tepelné záření“. Tepelné záření je závislé na teplotě tělesa a může se šířit i vakuem. V obecném smyslu je tepelné záření totožné se sáláním, tedy vyzařováním celého elektromagnetického spektra. Podstatou sálání je tepelný pohyb atomů a molekul tělesa. Z termodynamického hlediska jde o tepelný přenos při jakékoli vlnové délce.[2]

Při vysílání tepelného záření tělesem se jeho vnitřní energie zmenší o energii vyslaného tepelného záření. Vnitřní energie tělesa, na které dopadá tepelné záření, se přitom zvětší o energii pohlceného záření. Při dopadu tepelného záření na těleso mohou nastat v podstatě tři případy, a to tepelné záření látkou tělesa prochází a teplota tělesa se nezvýší, tepelné záření se od povrchu tělesa převážně odráží a zvýšení teploty je malé anebo tepelné záření je povrchem tělesa pohlcováno a těleso se zahřívá.[1]

Energie vyzařovaná tepelným zářením závisí na několika faktorech, jako jsou teplota tělesa, barva a struktura povrchu a velikost zářivé plochy. Nejmenší množství energie vyzařují stříbřitě lesklé povrchy, největší pak černé matné povrchy. Je-li teplota předmětu nižší než 525 °C, je téměř veškerá energie vyzářena v infračervené oblasti a záření tedy pro člověka není viditelné.[1]

Vyzařování těles v infračervené oblasti

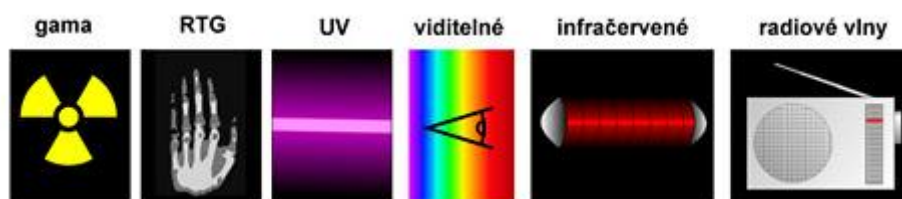
Infračervená oblast elektromagnetického záření (IR) zahrnuje oblast vlnové délky větší než viditelné (>750 nm) záření a menší než mikrovlnné záření (<1 mm). IR oblast se často dělí do tří podoblastí. Nejkratší vlnové délky tvoří blízkou infračervenou oblast (0,75 - 5 μ m), střední vlnovou oblast vlnové délky (5 - 30 μ m) a vzdálenou infračervenou oblast (30 - 1000 μ m). [3]

3.3 Atmosférická okna

Atmosféra není pro elektromagnetické záření absolutně transparentní, ale je propustná pouze v určitých oblastech vlnových délek, tzv. atmosférických oken. V oblastech mimo tato okna je elektromagnetické záření pohlcováno různými prvky, ze kterých je atmosféra složena, jako například skleníkové plyny (CO_2 , vodní pára, CH_4).

Tabulka 3.1: Rozdělení elektromagnetického záření [7]

Název	Vlnová délka
Gama záření	$\leq 0,01 \text{ nm}$
Rentgenové záření	$0,01 \text{ nm}-10 \text{ nm}$
Ultrafialové záření	$10 \text{ nm}-390 \text{ nm}$
Viditelné záření (světlo)	$390 \text{ nm}-750 \text{ nm}$
Infračervené záření	$750 \text{ nm}-1 \text{ mm}$
Mikrovlnné záření	$1 \text{ mm}-1 \text{ m}$
Rádiové záření	$1 \text{ m}-105 \text{ km}$



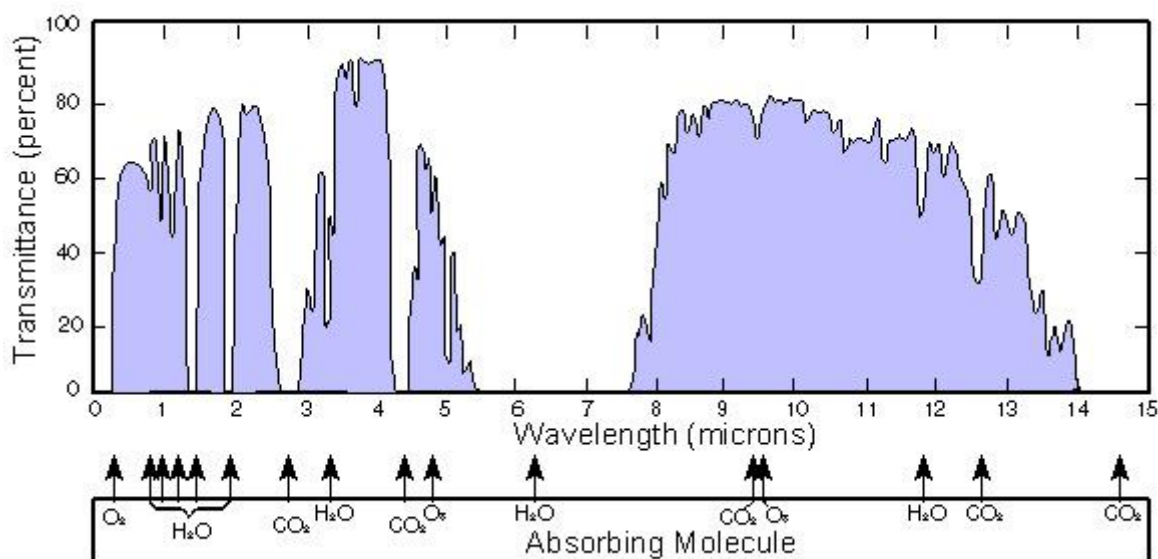
Obrázek 3.1: Celé elektromagnetické spektrum [12]

Dále se budeme zabývat oblastí infračerveného záření, v tomto intervalu vlnových délek jsou dvě atmosférická okna využívána v termografii a to intervaly $2-5 \mu\text{m}$ a $8-14 \mu\text{m}$. Propustnost záření v jednotlivých vlnových délkách je patrná z obrázku 3.2. Propustnost závisí na množství jednotlivých skleníkových plynů v okolní atmosféře a její teplotě. Největší proměnlivost vykazuje vzdušná vlhkost (vodní pára), obsah ostatních plynů je v čase téměř neměnný a považuje se za konstantní.

Základním parametrem atmosféry je její relativní vlhkost¹ udávaná v procentech. Znalost relativní vlhkosti umožňuje vypočítat útlum atmosféry v určitém spektru

¹ relativní vlhkost udává poměr mezi okamžitým množstvím vodních par ve vzduchu a obsahem vodních par při stejném tlaku i teplotě, ale maximálním nasycení

elektromagnetického záření (pro tento případ v oblasti zmiňovaných atmosférických oken) jako funkci vzdálenosti (šířky atmosféry) mezi objektem a snímačem záření. [7]



Obrázek 3.2: Propustnost atmosféry v oblasti IČ záření [5]

3.4 Planckův zákon

Max Planck vyslovil hypotézu, že černé těleso nemůže vyzařovat nebo pohlcovat energii v libovolném množství, ale nespojitě po kvantech. Každému kvantu záření pak přiřadil energii, která je přímo úměrná frekvenci záření:

$$E = h \cdot f, \quad (3.1)$$

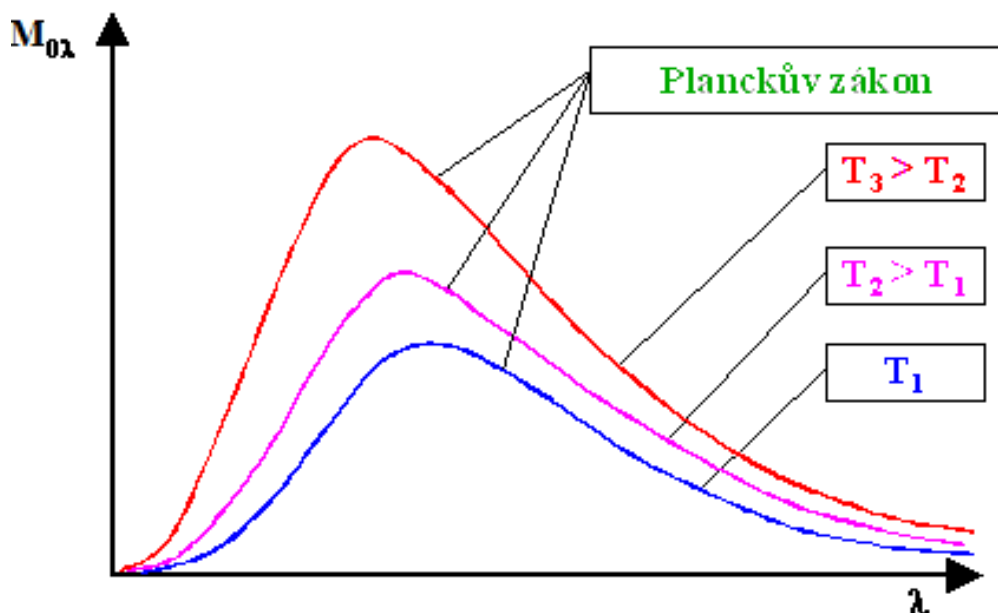
Kde E je energie kvanta záření, h je Planckova konstanta a f je frekvence fotonu.

Na základě tohoto zjednodušení sestavil rovnici (Planckův vyzařovací zákon), která popisuje záření černého tělesa ve všech oblastech spektra elektromagnetického vlnění:

$$M_0(\lambda, T) = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1)}, \quad (3.2)$$

kde $M(\lambda, T)$ je celková intenzita vyzařování o teplotě T na vlnové délce λ , c je rychlost světla ($c = 299792458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), h je Planckova konstanta ($h = 6,62606896 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$), k je Boltzmannova konstanta ($k = 1,380662 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$) a T je termodynamická teplota tělesa v kelvinech. [10]

Planckův vyzařovací zákon tedy říká jaké množství energie vyzáří do poloprostoru za jednotku času v nekonečně úzkém intervalu vlnových délek $\lambda + \Delta\lambda$ černé těleso s povrchovou teplotou T . [2]



Obrázek 3.3: Spektrální hustota zářivého toku dokonale černého tělesa v závislosti na vlnové délce záření a teplotě zářiče grafu [10]

Na obrázku 3.3 je vidět průběh intenzity vyzařované energie v závislosti na vlnové délce pro různé teploty černého tělesa. Vyzařování se posouvá se zvyšující se teplotou ke kratším vlnovým délkám.

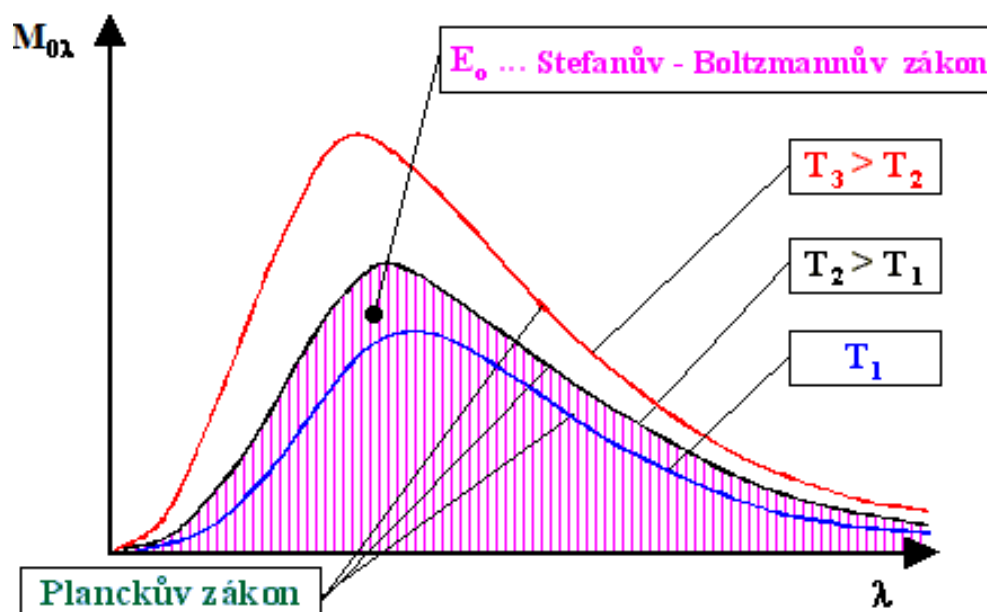
3.5 Stefan - Boltzmannův zákon

Každé těleso, které má nenulovou absolutní teplotu září, přičemž hustota zářivého toku je úměrná čtvrté mocnině absolutní teploty.

Matematickou formulaci Stefan – Boltzmannova zákona lze získat, provedeme-li integraci spektrální hustoty zářivého toku dokonale černého tělesa $M_0(\lambda, T)$ dle Planckova vyzařovacího zákona, a to přes celý rozsah vlnových délek a za konstantní teploty, jak vidíme na obrázku 3.4.[13]

$$M_0 = \int_0^{\infty} M_0(\lambda, T) d\lambda = \sigma \cdot T^4, \quad (3.3)$$

kde M_0 je celková intenzita vyzařování, σ je Stefan – Boltzmannova konstanta ($\sigma = 5,67032 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$) a T je termodynamická teplota tělesa.



Obrázek 3.4: Zobrazení Stefan – Boltzmannova zákona v diagramu závislosti spektrální hustoty zářivého toku dokonale černého tělesa na vlnové délce záření, vznikne integrací Planckova vyzařovacího zákona přes celý rozsah vlnových délek a za konstantní teploty. [13]

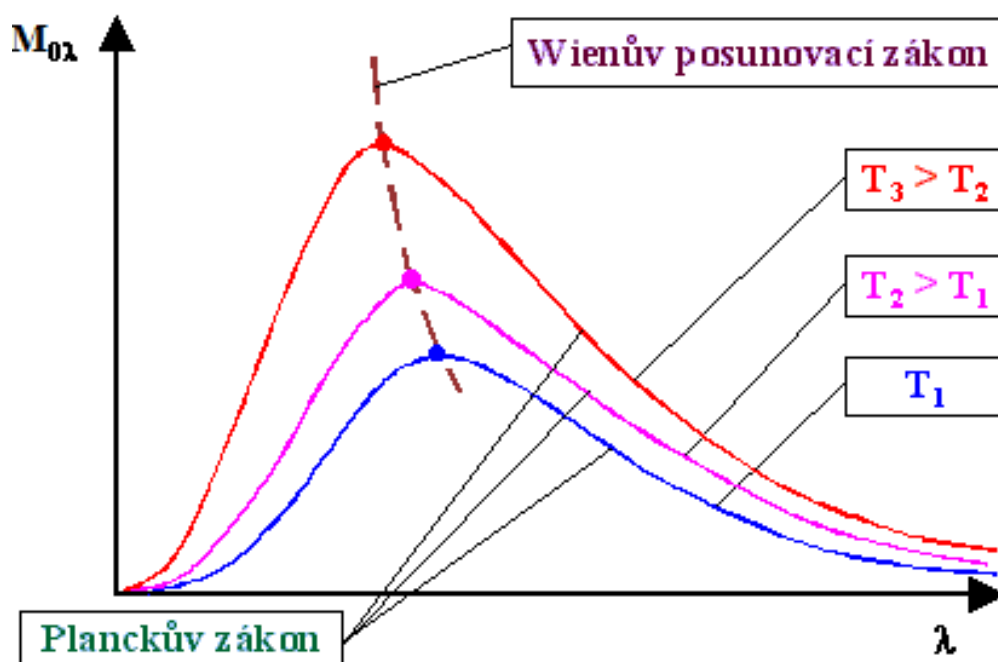
3.6 Wienův posunovací zákon

Německý fyzik Wilhelm Wien zabývající se problematikou spektrální hustoty zářivého toku v závislosti na vlnové délce došel k závěru, označovaném dnes jako Wienův posunovací zákon, který říká: S rostoucí teplotou zářiče se posouvá maximální hodnota spektrální hustoty zářivého toku ke kratším vlnovým délkám. [11]

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}, \quad (3.4)$$

kde λ_{max} je vlnová délka, při níž je hodnota spektrální hustoty zářivého toku při dané teplotě zářiče maximální, b je Wienova konstanta ($b = 2,8978 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$) a T je termodynamická teplota tělesa.

Jinými slovy Wienův posunovací zákon je derivací Planckova vyzařovacího zákona podle vlnové délky. Vyjadřuje vlnovou délku, na které těleso dané teploty vyzařuje maximum energie. Grafické vyjádření Wienova posunovacího zákona můžeme vidět na obrázku 3.5.



Obrázek 3.5: Zobrazení Wienova posunovacího zákona v diagramu závislosti spektrální hustoty zářivého toku dokonale černého tělesa na vlnové délce záření [11]

3.7 Kirchhoffův zákon termální radiace

Kirchhoff vytvořil obecnou teorii emise a radiace (Kirchhoffův - Bunsenův zákon), která říká, že schopnost látky emitovat záření je shodná se schopností jej absorbovat při stejné teplotě [14]. Jeho interpretace se často dělí na tzv. první a druhý Kirchhoffův zákon.

První Kirchhoffův zákon:

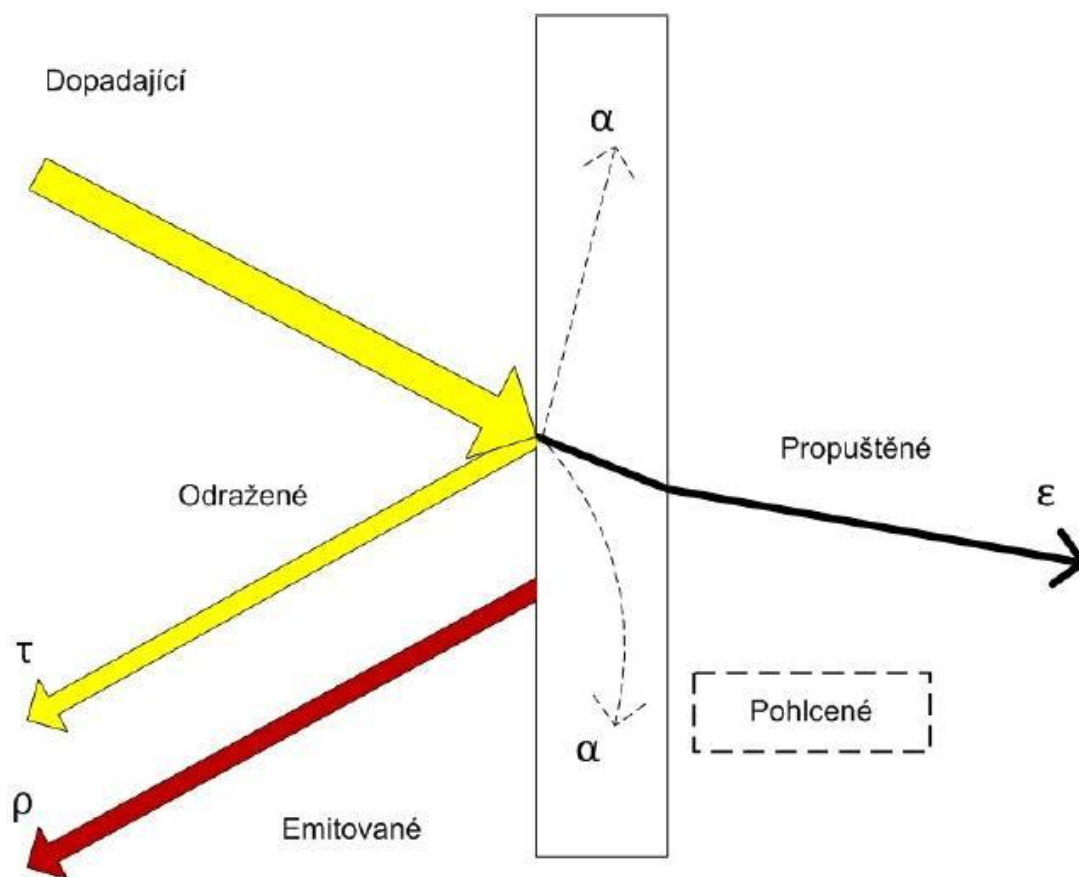
$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1, \quad (3.5)$$

kde α_λ je spektrální absorpce, ρ_λ je spektrální reflektance a τ_λ je spektrální propustnost.

Druhý Kirchhoffův zákon:

$$\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda \quad (3.6)$$

kde ε_λ je spektrální emisivita tělesa a α_λ je spektrální pohltivost materiálu. Tento zákon umožňuje zjišťování emisivity materiálu pomocí referenčního záření se známou intenzitou.



Obrázek 3.6: Kirchhoffův zákon termální radiace [6]

4 Konstrukce IČ termografické kamery

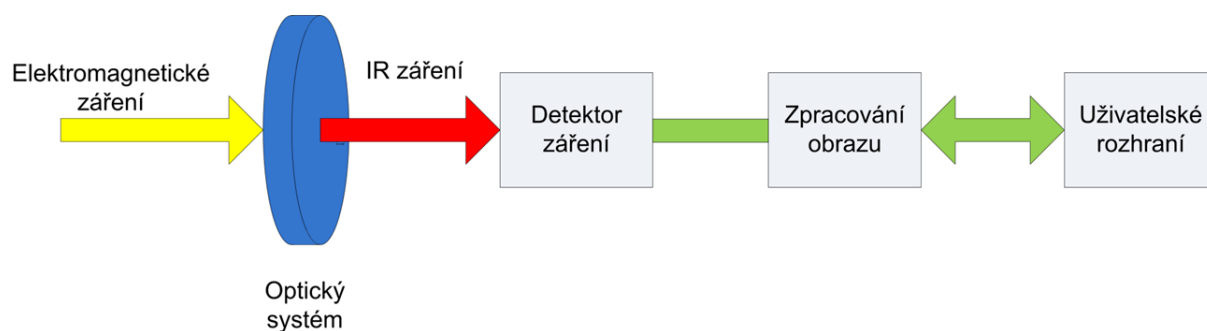
Konstrukci IČT kamery lze dle její funkce rozdělit na samostatné subsystémy.

Optický systém - zachycuje infračervené záření z měřeného objektu a soustředí jej na senzor infračerveného záření. Tento systém se skládá ze soustavy čoček, závěrky, ostření a uložení IČ senzoru.

Detektor IČ záření - je maticový senzor, který převádí dopadající IČ záření na elektrický signál, který je následovně digitalizován a zpracován ve výsledný termogram².

A/D převod a zpracování obrazu - A/D převodník převádí analogový signál ze senzoru infračerveného záření na digitální signál, který je dalšími obvody zpracován ve výsledný termogram, uložen na záznamové médium, zobrazen na obrazovku IČT kamery apod.

Uživatelský interface - zajišťuje zobrazení termogramu na obrazovce IČT kamery, jeho uložení na záznamové médium, komunikaci prostřednictvím dalších interface (USB, Ethernet, FireWire apod.), ovládání kamery apod.



Obrázek 4.1: Blokové schéma digitální IČT kamery [15]

4.1 Optický systém

Optikou termokamer je téměř výhradně v současné době spojka z germánia bez možnosti optického zoomu. Zákony optiky jsou stejné jako třeba u skleněné čočky, liší se pouze použitý materiál. Na povrchu čočky je navíc nanесena antireflexivní vrstva, která zabraňuje odrazu infračerveného záření na povrchu čočky. Dochází tak ke zvýšení

² termogram znázorňuje rozložení zdánlivých sálavých teplot na povrchu zkoumaného zdroje záření formou barevného spektra, kde zaznamenané teplotě odpovídá barevný tón

její propustnosti až na 90% a více. Antireflexní vrstva funguje zároveň jako filtr, na povrch čočky dopadá elektromagnetické záření všech vlnových délek a optika propouští jen záření požadovaných vlnových délek [15], jak můžeme vidět na obrázku 4.1.

4.2 Detektor IČ záření

Detektor infračerveného záření převádí dopadající infračervené záření na elektrický signál, který je další elektronikou převeden ve výsledný termogram, který je prezentován uživateli termokamery jako výsledek měření. [15]

4.2.1 Základní parametry IČ detektorů

Integrální citlivost $K = \frac{U}{\Phi}$ [V·W⁻¹] je dána podílem elektrického napětí U na výstup detektoru a zářivého toku Φ dopadajícího na citlivou plochu detektoru.

Spektrální citlivost $K_\lambda = \frac{U}{\Phi_\lambda}$ [V·W⁻¹] udává závislost citlivosti K na vlnové délce λ .

Relativní spektrální citlivost $S_\lambda = \frac{K_\lambda}{K_{\lambda max}}$ [-]

NEP (Noise Equivalent Power) (tzn. výkonový ekvivalent) $NEP = \Phi \cdot \frac{\sqrt{u_s^2}}{U}$ [W·Hz^{-1/2}] kde $\sqrt{u_s^2} = \sqrt{\frac{U_s^2}{\Delta f}}$ je spektrální hustota šumového napětí, $\sqrt{U_s^2}$ je efektivní hodnota integrálního šumu napětí a Δf je šířka frekvenčního pásma.

NEP udává zářivý tok, při kterém je hodnota výstupního signálu U právě rovna efektivní hodnotě spektrální hustoty šumového napětí.

Detektivita (detekční schopnost) $D = \frac{1}{NEP}$ je definována jako převrácená hodnota NEPu.

Normovaná (specifická) detektivita $D^* = D\sqrt{S} = \frac{\sqrt{S}}{NEP}$ [W⁻¹·m·Hz^{1/2}].

Obecně lze stanovit ze znalosti tepelného toku poměr signál/šum $\frac{S}{N} = \frac{\Phi D^*}{\sqrt{S\Delta f}}$.

4.2.2 Rozdělení detektorů

Dle vzniku výstupního signálu dělíme detektory do dvou základních skupin a to na tepelné a kvantové (někdy označované jako fotoelektrické) detektory IČ.

Tepelné detektory infračerveného záření

U tepelných detektorů dochází při absorpci fotonů k oteplení citlivé části detektoru a pohlcená energie se vyhodnocuje nepřímo prostřednictvím snímačů teploty.

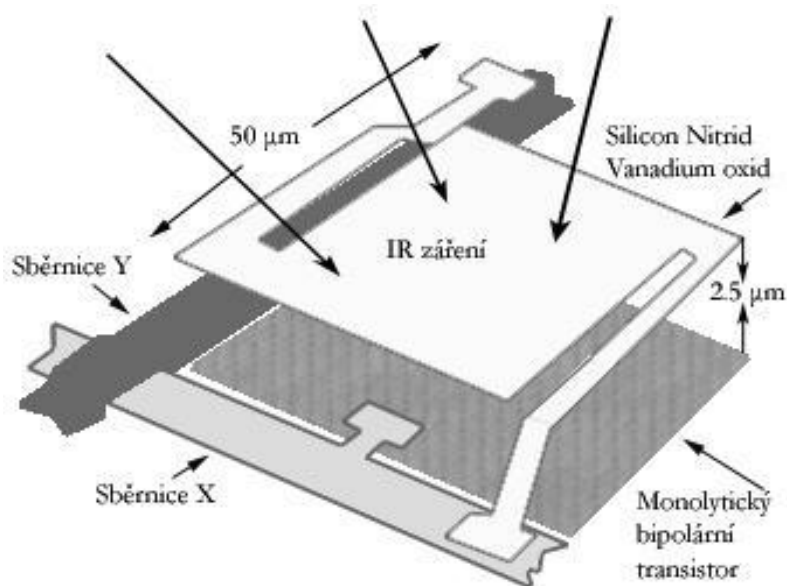
Tepelné detektory se dělí na termoelektrické, bolometrické a pyrometrické detektory, dále také pneumatické detektory (Golayova cela), detektory založené na změně teplotní krystalické struktury (kapalné krystaly) nebo detektory založené na rychlosti vypařování látky (evaporografy). Tři poslední jmenované detektory se ale u bezkontaktních měřidel teploty (pyrometrech) prakticky nepoužívají. [2]

Termoelektrické detektory

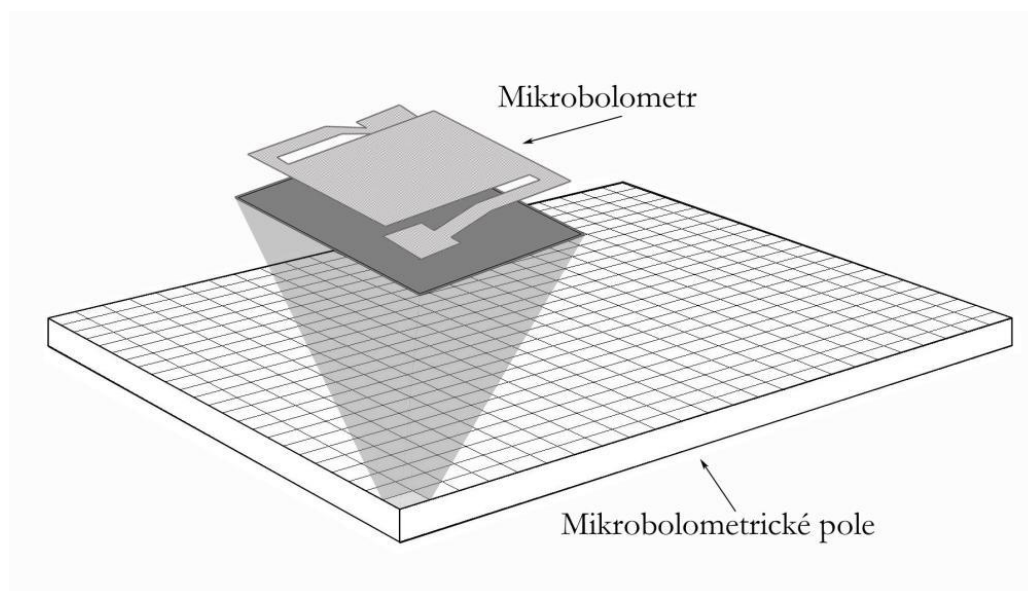
Termočláňkové detektory (tzv. termoelektrické baterie) používají principu změny termoelektrického napětí dvojice vodičů vlivem rozdílů teplot mezi měřicím (ozářeným) spojem a srovnávacím (zatemněným) spojem. Jsou to vlastně sériově řazené termoelektrické články většinou konstruované jako tenké kovové pásy o tloušťce cca 0,03mm. Nejčastějšími materiály při konstrukci termoelektrické baterie jsou LiF, CaF₂, tavený Si atd. Jejich nevýhodou je poměrně pomalá reakce na změnu signálu záření. [4]

Bolometrické detektory

Snímají oteplení detektoru teplotně závislým odporovým materiálem, tj. pohlcené záření způsobí změnu teploty odporového čidla a tím i změnu jeho elektrického odporu. Používají se tenkovrstvé mikroelektronické technologie na bázi odporových materiálů z kysličníků (MgO, MnO, NiO, TiO₂, chalkogenidové sklo aj.). Mikrobolometrické senzory lze uspořádat jako řadové nebo plošné detektory. Plošné detektory se používají v termovizních kamerách v maticovém uspořádání FPA (Focal Plane Array). Výhodou tohoto detektoru je, že detektivita není závislá na vlnové délce. [4]



Obrázek 4.2: Detail mikrobolometru [15]



Obrázek 4.3: Maticové pole mikrobolometrů [15]

Pyroelektrické detektory

Tyto detektory jsou založeny na tzv. pyrometrickém jevu, tj. změně spontánní polarizace při změně teploty. Pyroelektrický jev se vyskytuje u pyroelektrik s trvalou polarizací nebo u některých feroelektrik. Nejčastěji se používají materiály jako TGS (triglycin-sulfát), PZT (keramické materiály na bázi titaničitanu a zirkoničitanu olovnatého) a PVDF (polyvinylfluorid). Detektor si lze představit jako kondenzátor, na jehož elektrodách se při změně polarizace naindukuje elektrický náboj. Náboj na elektrodách se vybíjí přes rezistor (daný svodovým odporem pyroelektrika a vstupním odporem zesilovače). Před každým odměrem je nutné záření dopadající na detektor

zaclonit a opět odclonit nebo musí být zářivý tok časově proměnný. Velkou výhodou tohoto typu detektorů je vysoká citlivost ve velkém rozsahu intenzit dopadajícího záření. [4]

Kvantové detektory infračerveného záření

Detektory, u nichž dopadající elektromagnetické záření způsobí interakci s hmotou přechod elektronů se nazývají kvantové. [2]

Intrinsické detektory

Dělí se na dvě základní skupiny, na tzv. intrinsické fotovodivé detektory a intrinsické fotovoltaiické detektory.

Intrinsický fotovodivý detektor je sestaven z čistého (nedotovaného) polovodiče. Při ozáření struktury detektoru se mění její vodivost, aby tato změna byla detekovatelná, je nutné přiložit vnější elektrické pole. Změna vodivosti je vyvolána interakcí fotonů záření a atomů polovodičové struktury. Uvolněním elektronu z vazby atomu vzniknou dva nosiče náboje („elektron“ a „díra“). Na rozdíl od dotovaných polovodičů, zde není žádný nosič majoritní ani minoritní, a tak se při změně vodivosti uplatní oba druhy nosičů.[6]

Intrinsické fotovoltaiické detektory jsou na bázi struktury P-N. Dopadající fotony mohou s materiálem detektoru reagovat několika způsoby. Pro detektor je podstatný ten, kdy foton dodá elektronu vázaného v atomu takovou energii, aby opustil elektronový obal a stal se z něj volný nosič. Vzniká záporný náboj, elektron. Zároveň se uvolněním elektronu z atomu vytvoří kladný náboj, nebo-li díra. Tyto volné náboje jsou přitahovány strukturou s opačnou orientací, tak že elektrony putují do oblasti P a díry do oblasti N. Jejich přesunem vzniká elektrické pole a jeho velikost je závislá na intenzitě dopadajícího záření. [6]

Extrinsické detektory

Extrinsické detektory jsou podobné intrinsickým, liší se mechanismus uvolnění volného náboje. Detektor je tvořen polovodičovou strukturou, která je dotovaná příměsí. Při interakci struktury s fotonem nejsou volné nosiče uvolňovány ze základní látky, ale z příměsí. Existují jak extrinsické fotovodivé, tak extrinsické fotovoltaiické detektory. [6]

QWIP

Quantum Well Infrared Photo detector je anglický název dalšího typu detektorů. Pracují na podobném principu jako extrinsické detektory. Příměsi nejsou v celém objemu, ale pouze v miniaturních oblastech. Kolem těchto malých vysoce dotovaných center se změní šířka zakázaného pásu a vznikne takzvaná kvantová past (studně, anglicky quantum well). Foton předá energii nutnou k posunu elektronu do vyšší energetické hladiny nejen přímou interakcí s elektronem, ale i s okolní kvantovou pastí. Její průměr se pohybuje od 10 do 100 atomů. Z toho vyplývá, že citlivost QWIP detektorů je vyšší než v předchozích případech. Nevýhodou těchto detektorů je nutnost jejich chlazení na velmi nízké teploty (okolo 65 K). [6]

5 Vlivy na přesnost měření

IČT kamera stejně jako jakékoliv jiná měřidla podléhá nejistotě měření³. Faktory ovlivňující přesnost měření jsou zejména vlivy okolí, vlastnosti měřeného objektu a také vlastnosti samotné IČT kamery.

U IČT kamery je nutno kompenzovat pět vlastností okolí a měřeného objektu, které negativně ovlivňují měření:

- emisivita objektu;
- teplota odraženého záření;
- vzdálenost mezi objektem a kamerou;
- relativní vlhkost;
- teplota atmosféry.

5.1 Emisivita

Emisivita je funkcí teploty, vlnové délky a řady vlastností povrchu měřeného objektu. Lze ji popsat jako podíl intenzity vyzařování reálného tělesa a absolutně černého tělesa při téže teplotě.

$$\varepsilon = \frac{M}{M_0}, \quad (5.1)$$

kde ε emisivita povrchu tělesa M je intenzita vyzařování reálného tělesa a M_0 je intenzita vyzařování černého tělesa.

Množství tepelného záření, které je z povrchu předmětu vyzářeno, závisí na jeho teplotě, ale i na emisivitě. Emisivita je tak v jistém smyslu efektivita vyzařování. Čím je emisivita vyšší a blíže 1, tím více tepelného záření povrch při dané teplotě vyzáří. Při emisivitě rovné 1 vyzáří povrch maximální množství tepelného záření, které je z fyzikálního hlediska možné vyzářit při dané povrchové teplotě černého tělesa. Tuto hodnotu emisivity má však pouze „ideální“ černé těleso a v praxi nejsme schopni této hodnoty dosáhnout.[16]

U tzv. šedého tělesa je emisivita rovna konstantě pro všechny vlnové délky. Bohužel šedé těleso je pouze zidealizovaný a v technické praxi neexistující objekt.

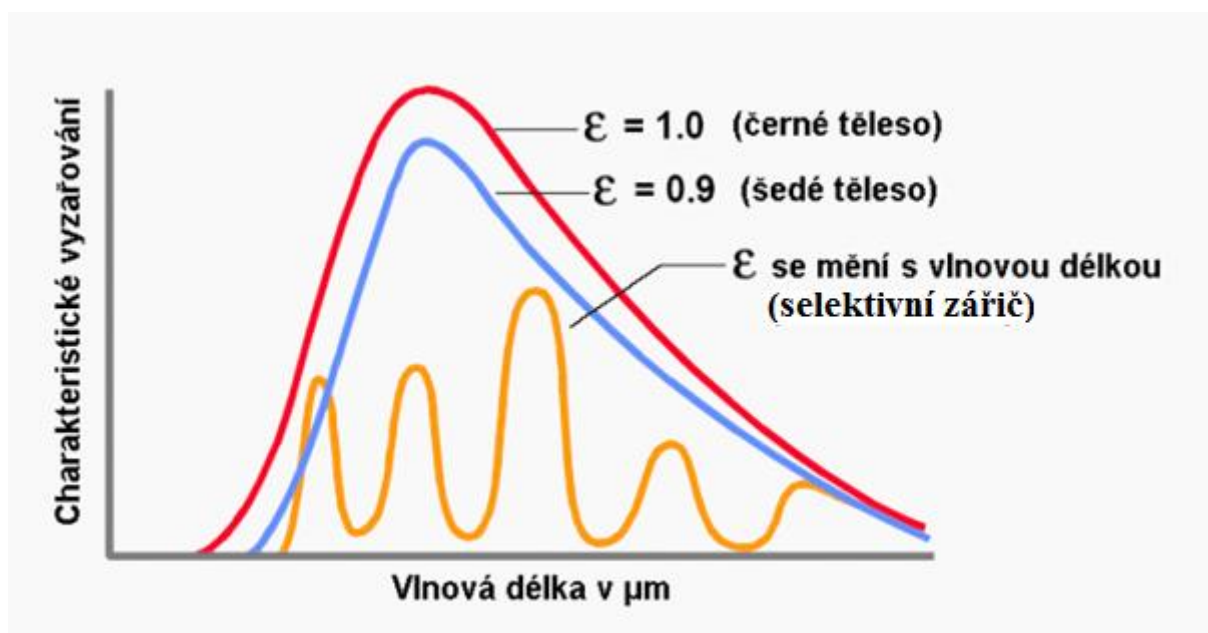
³ nejistota měření je označení pro vlivy, které souvisí s výsledkem měření a charakterizují rozsah hodnot, které je možné racionálně přiřadit k měřené veličině

Selektivní zářič, je zářič u kterého je emisivita funkcí vlnové délky (tzv. spektrální emisivita). Mezi takové zářiče patří například plyny a plastové fólie.

Tělesa tedy můžeme rozdělit do tří skupin a to černé těleso, šedé těleso a selektivně emitující těleso. Rozdíly mezi těmito tělesy jsou shrnuty v tabulce 5.1 a graficky znázorněny na obrázku 5.1. V praxi při měření uvažujeme, že emisivity těles jsou v daném rozsahu vlnových délek konstantní, tedy tělesa dostatečně šedá, aby nedocházelo k příliš velké chybě.

Tabulka 5.1: základní rozdělení těles podle jejich emisivity

Černé těleso	$\varepsilon(\lambda) = 1$, konstantní
Šedé těleso	$0 < \varepsilon(\lambda) < 1$, konstantní
Selektivně emitující těleso	$0 < \varepsilon(\lambda) < 1$, proměnná



Obrázek 5.1: Charakteristické vyzařování při různých emisivitách [19]

5.1.1 Příklady hodnoty emisivity různých materiálů

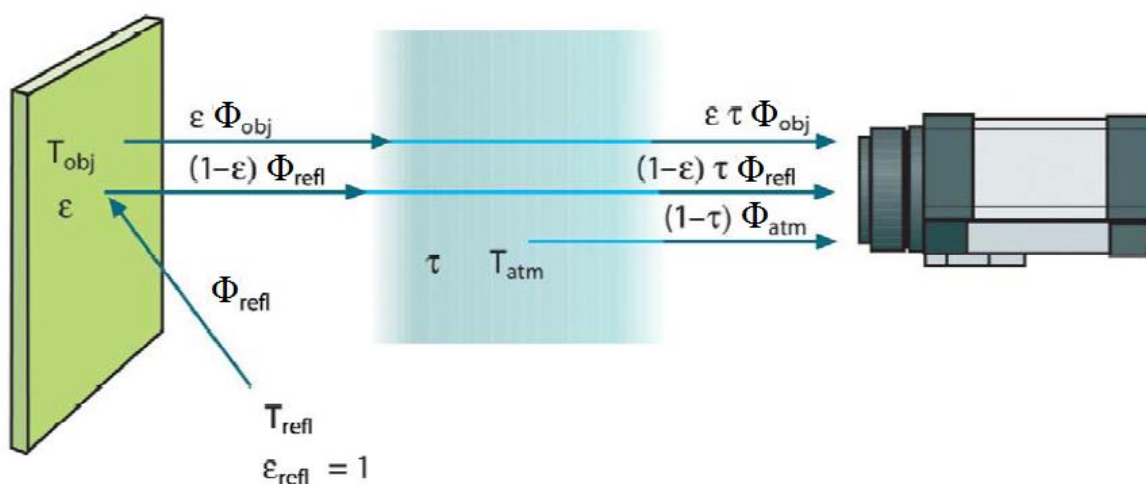
Neoxidované kovy jsou extrémním případem naprosté nepropustnosti a vysoké odrazivosti, která se příliš nemění v různých vlnových délkách. Proto je emisivita kovů nízká – zvyšuje se pouze s teplotou. Nekovy mají většinou vysokou emisivitu, která se snižuje s teplotou. [18]

Tabulka 5.2: hodnoty emisivity běžných materiálů [17]

Materiál	Povrch	Emisivita
Hliník	leštěný	0,05
	silně zoxidovaný	0,25
Asbestová deska		0,96
Cihla	běžný	0,85
Bronz	leštěný	0,1
Litina	hrubý odlitek	0,81
Uhelný prach		0,96
Beton		0,54
Měď	leštěný	0,01
Měď	zoxidovaný	0,65
Sklo		0,92
Železo	za tepla válcovaný	0,77
	kovaný, leštěný	0,28
Rtuť	čistý	0,1
Papír	bílý	0,9
Ocel	hrubý	0,96
Voda		0,98

5.2 Vlivy okolí

Vliv prostupnosti atmosféry a okolního prostředí je patrný z obrázku 5.2.



Obrázek 5.2: Vliv prostupnosti atmosféry a záření okolního prostředí [20]

Celkový zářivý tok dopadající na objektiv za předpokladu, že prostředí tvoří černý prostor a že je zanedbán zářivý tok od kamery k měřenému objektu, je dán vztahem

$$\Phi = \varepsilon\tau\Phi_{obj} + (1-\varepsilon)\tau\Phi_{refl} + (1-\tau)\Phi_{atm}. \quad (5.2)$$

První složka na pravé straně rovnice je dána emisivitou měřeného objektu, druhá složka popisuje odražené záření z prostředí, ve kterém měření teploty provádíme, přičemž $(1 - \varepsilon)$ je odrazivost objektu za předpokladu, že jeho prostupnost je nulová a třetí složka je dána emisivitou okolní atmosféry, přičemž $(1-\tau)$ je emisivita atmosféry za předpokladu, že její odrazivost je nulová. [4]

Přímý dopad záření prostředí je eliminován soustavou clonek před detektorem termokamery.

5.2.1 Atmosféra

Je asi nejméně problematická, jejíž vliv (útlum tepelného záření, ale také vyzařování tepelného záření) lze s vysokou přesností kompenzovat po změření atmosférické teploty, atmosférické vlhkosti a vzdálenosti od měřeného objektu a zadání těchto hodnot do termokamery či příslušného programového vybavení pro zpracování snímků. [16]

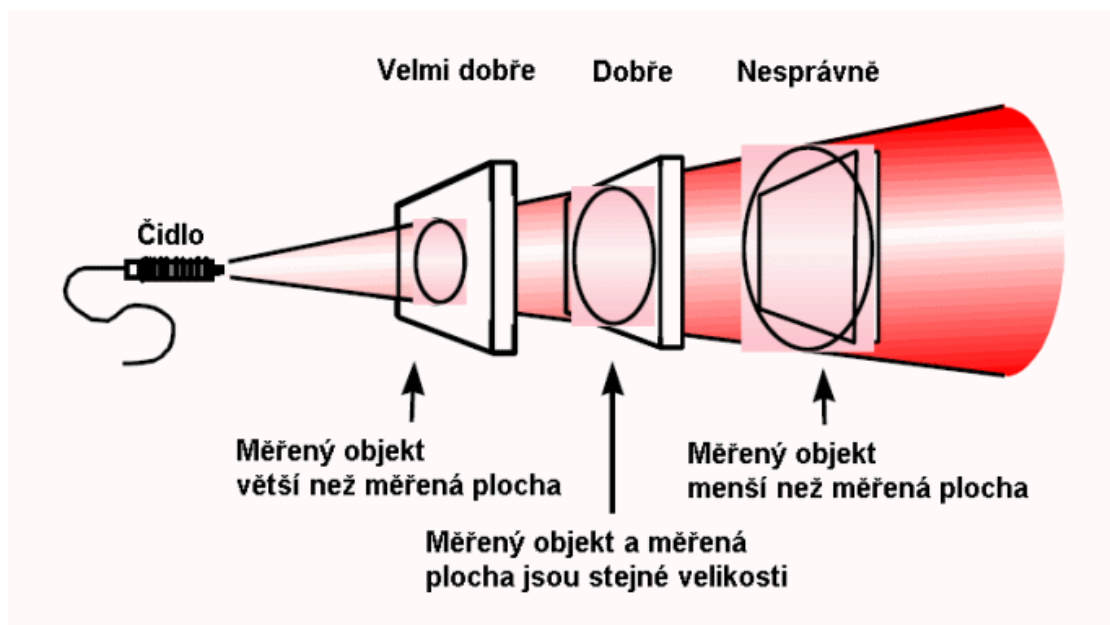
5.2.2 Odražená zdánlivá teplota

Tzv. odražená zdánlivá teplota je okolní tepelné záření, které se odráží od lesklého povrchu měřeného objektu a dopadá na detektor termokamery. Termokamera pak přirozeně není schopna rozlišit, zda jde o vlastní tepelné záření, nebo odražené tepelné záření. Odražené tepelné záření tedy musíme stanovit a zadat jeho hodnotu do termokamery, aby termokamera mohla jeho vliv opět kompenzovat. Vlastní měření se provádí pomocí IČ odražeče dle normy ČSN EN 18434-1. [16]

Je třeba zdůraznit, že vliv odražené zdánlivé teploty je tím větší, čím větší je odrazivost povrchu (samozřejmě v dané části vlnového pásma, kde je citlivá použitá termokamera). Odrazivost povrchu je tím menší, čím větší je emisivita (Kirchhoffův zákon). Proto platí, že čím je vyšší emisivita, tím je menší vliv odražené zdánlivé teploty. Při vysokých emisivitách (0,95 a vyšší) tedy v některých situacích stačí odraženou zdánlivou teplotu stanovit přibližně (odhadem a na základě zkušeností). [16]

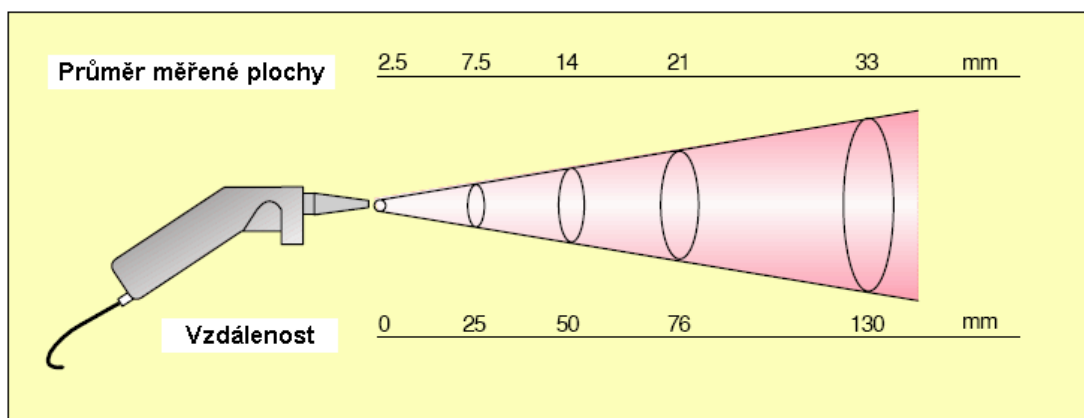
5.3 Vzdálenost mezi objektem a kamerou

Optický systém termokamery snímá energii vyzařovanou z povrchu tělesa z kruhové měřené plochy a soustřeďuje ji na detektor. Měřený objekt proto musí úplně vyplňovat tuto měřenou plochu, jinak je naměřená hodnota ovlivněna i zářením pozadí (okolních ploch), jak je patrné na obrázku 5.3. [19]



Obrázek 5.3: Znáznornění zaměřené velikosti snímané plochy detekované bezdotykovým teploměrem [19]

Optické rozlišení je definováno poměrem $D:S$, což je průměr měřené plochy D k vzdálenosti měřicího přístroje od měřeného objektu S . Čím menší bude tato hodnota, tím lepší je optické rozlišení měřicího přístroje a tím menší může být měřená plocha při dané vzdálenosti viz obrázek 5.4. [19]



Obrázek 5.4: Optický diagram infračerveného čidla. Ve vzdálenosti 130 mm je měřená plocha o průměru 33 mm, což dává poměr $D:S$ přibližně 4:1. [19]

6 Pístový spalovací motor jako tepelný stroj

Pístové spalovací motory jsou stroje, pracující v otevřeném cyklu a tepelná energie, určená k přeměně na energii mechanickou, se získává chemickou cestou, spalováním hořlavé směsi paliva se vzduchem uvnitř motoru. [24]

PSM pracují objemovým způsobem, s přetržitým průtokem pracovních látek, tj. vzduchu i paliva; hořlavá směs se spaluje ve spalovacím prostoru, umístěném uvnitř válce motoru. Hořlavá směs je vytvořena ze složek paliva a vzduchu, přičemž jako palivo se nejčastěji používají směsi kapalných uhlovodíků získávaných z ropy (benzin, nafta). [24]

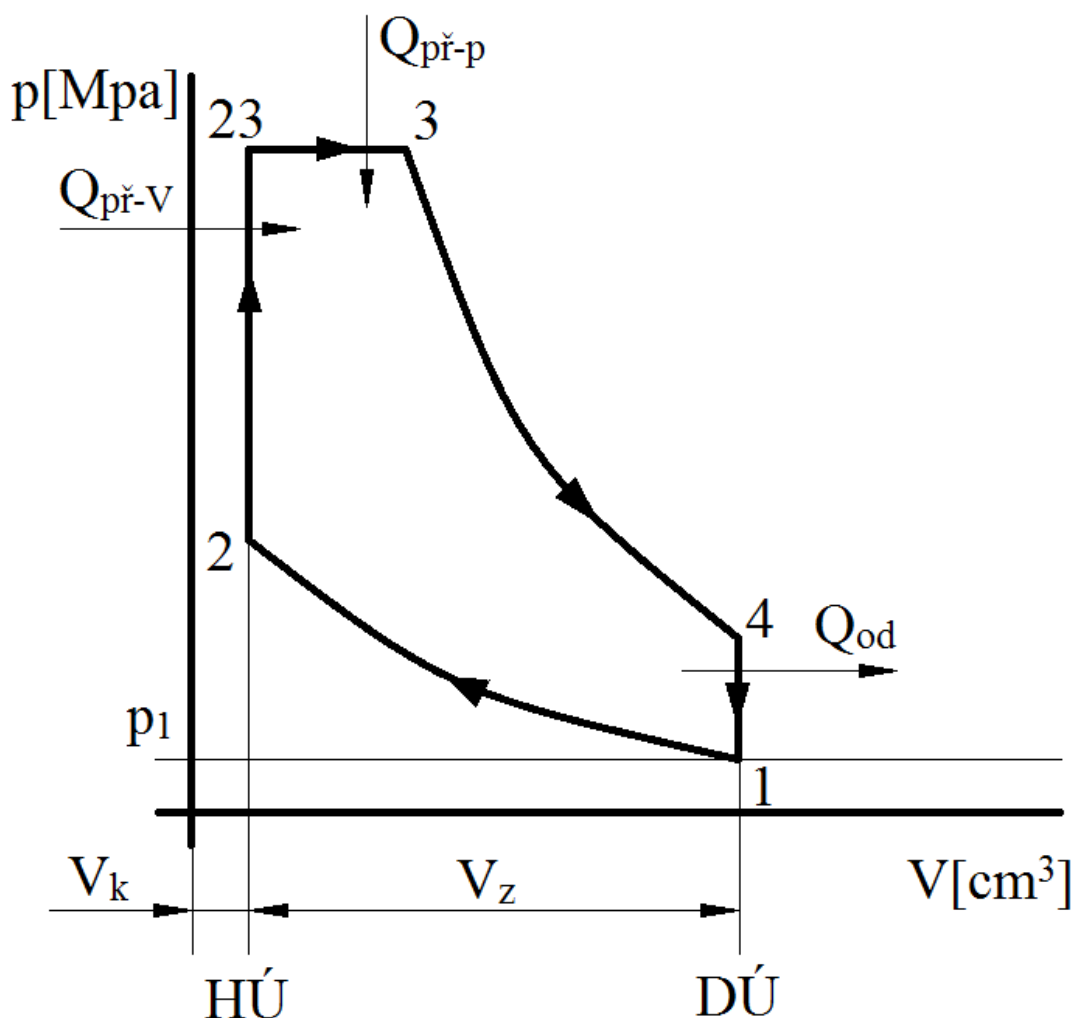
6.1 Teorie pracovních oběhů PSM

Pro teoretické vyšetřování vlastností pracovních oběhů PSM a pro posouzení vlivu nejvýznamnějších činitelů na proces přeměny tepelné energie v mechanickou práci se skutečný pracovní oběh zjednodušuje a idealizuje. Tzv. ideální (porovnávací) oběhy PSM jsou konstruovány s následujícími předpoklady:

- náplň válce (pracovní látku) tvoří ideální dvouatomový plyn s konstantními látkovými vlastnostmi ($c_p, c_v = konst.$);
- změny stavu náplně ve válci se považují za vratné;
- válec je dokonale těsný, celá soustava válce je dokonale tepelně izolovaná (při objemových změnách nedochází k výměně tepla s okolím, t.zn., že komprese a expanze probíhají adiabaticky);
- objemové změny začínají a končí vždy v krajních polohách pístu (tj. v DÚ a HÚ);
- přívod tepla do oběhu se uskutečňuje buď při stálém objemu (v HÚ), nebo při stálém tlaku (od HÚ v počáteční fázi expanze), nebo kombinací přívodu části tepla při stálém objemu a zbytku tepla při stálém tlaku. [24]

6.1.1 Ideální pracovní oběh PSM

Obecně se skutečným benzinovým i naftovým motorům nejvíce přibližuje ideální oběh se smíšeným přívodem tepla (tzv. Sabatův, Seiligerův cyklus). Tento cyklus představuje kombinaci Ottova a Dieselova oběhu, které jsou jeho limitními stavy. Jako takový jej lze použít jako ideální oběh pro oba typy spalovacích motorů.



Obrázek 6.1: Sabatův, Seiligerův cyklus v p - V diagramu

Oběh se skládá ze čtyř fází, které se uskuteční během dvou zdvihů (zdvihem se rozumí pohyb pístu z jedné krajní polohy do druhé):

1. fáze - komprese; při pohybu pístu z dolní úvrati (nejvzdálenější polohy pístu od hlavy válce), odpovídající v p - V diagramu bodu 1, se pracovní látka adiabaticky stlačuje až do horní úvrati pístu (polohy pístu nejbližší hlavě válce), odpovídající v p - V diagramu bodu 2; pohybu pístu je dosaženo přivedením energie zvenku, například při startování motoru od spouštěče a při chodu motoru od setrvačnick. [23]

2. fáze - přívod tepla $Q_{př}$; při izochorické části přívodu tepla $Q_{př-V}$ dojde k izochorickému zvýšení tlaku z p_2 na p_3 . Druhá část přívodu tepla $Q_{př-p}$ probíhá jako izobarický ohřev, při kterém dojde ke zvýšení objemu z $V_2 = V_{23} = V_k$ na objem V_3 . [24]

3. fáze - expanze; pracovní látka se adiabaticky rozpíná a tlačí na píst; píst se pohybuje z horní (bod 3) do dolní úvrati (bod 4); tlak spalin působící na píst koná práci, která je klikovým mechanismem převáděna na hřídel motoru jako mechanická energie;

část z této práce je akumulována v setrvačnicku spojeném s hřídelem motoru, část je k dispozici pro jiné užití. [23]

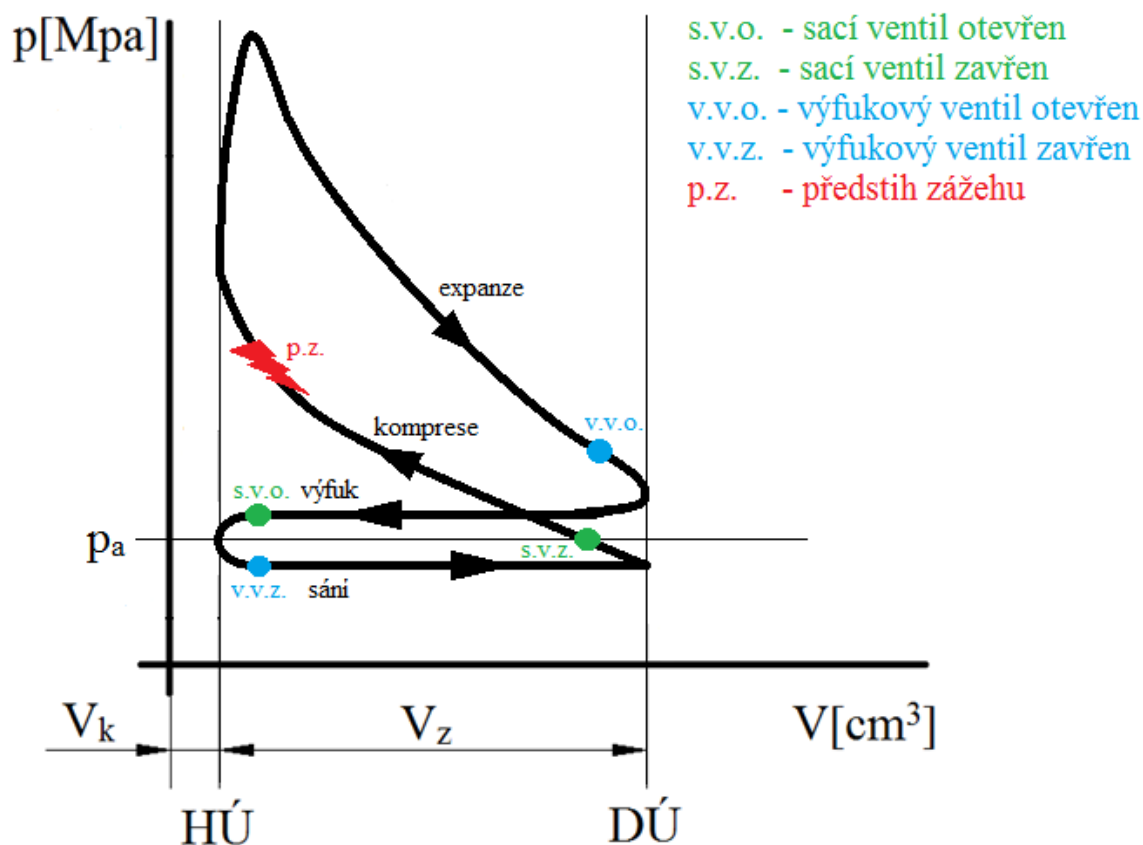
4. fáze - odvod tepla Q_{od} v dolní úvrati pístu (bod 4) se z pracovní látky izochoricky odvede teplo Q_{od} , pracovní látka se ochlazuje a její tlak klesá z p_4 na p_1 ; oběh se vrátil do počátečního stavu.[23]

6.1.2 Skutečný pracovní oběh PSM

Skutečné pracovní oběhy PSM jsou výrazně ovlivněny podmínkami a možnostmi technického provedení motoru a jeho jednotlivých ústrojí, významný vliv na vlastnosti skutečných pracovních oběhů má i chování pracovní náplně válce v průběhu pracovního oběhu. [24]

Reálný pracovní oběh PSM se dále od ideálního oběhu liší řadou dalších důvodů:

- Oběh je otevřený, dochází při něm k výměně látky s okolím, komprese a expanze jsou polytropické.
- Hoření paliva neproběhne v jediném okamžiku při horní úvrati pístu, ale trvá určitou dobu; proto přívod tepla není izochorický ani izobarický.
- Výfuk spalin, kterým je v otevřeném oběhu uskutečněn odvod tepla, neproběhne v jediném okamžiku při dolní úvrati pístu, ale za určitou dobu; proto odvod tepla není izochorický.



Obrázek 6.2: Skutečný pracovní oběh v p - V diagramu

Podle diagramu na obrázku 6.2 pracují čtyřdobé spalovací motory, které používají jako palivo benzín. Cyklus se skládá ze čtyř fází: sání, komprese, expanze a výfuk, které lze popsat následovně:

- 1. sání** - Píst se pohybuje z levé krajní polohy do pravé krajní polohy. Přes otevřený sací ventil proudí do pracovního prostoru směs vzduchu a benzínové mlhoviny.
- 2. komprese** - Při pohybu vlevo začíná komprese. Oba ventily (sací i výfukový) jsou uzavřené. Nasátá směs zmenšuje svůj objem, zvětšuje tlak a teplotu. V bodě předstihu zážehu je pracovní látka zapálena elektrickou jiskrou. Dochází k výbuchu zapálené směsi a tlak prudce stoupá.
- 3. expanze** - Oba ventily jsou stále uzavřené. Směs paliva a vzduchu zapálená elektrickou jiskrou shoří a následuje expanze vzniklých zplodin. Ty při pohybu pístu směrem vpravo konají práci.
- 4. výfuk** - Před DÚ se otevře výfukový ventil. Píst se pohybuje směrem doleva a spaliny z pracovního prostoru válce jsou vytlačovány do výfukového potrubí. V HÚ je výfuk dokončen a cyklus začíná znovu.

7 Měření

V této kapitole se zaměřím na popis měřicí metody, vlastní měření teploty jednotlivých částí pohonné jednotky pomocí termokamery, určení emisivity jednotlivých materiálů a porovnání teploty po nástřiku se známou emisivitou.

7.1 Seznámení se s měřicí technikou a vyhodnocovacím zařízením

7.1.1 Měřicí technika

Všechna měření byla prováděna termokamerou FLIR T335.

Tabulka 7.1: Parametry měřicí techniky IČT FLIR T335 [25]

Rozlišení detektoru	320 x 240 pixelů
Typ detektoru	nechlazený mikrobolometr
Frekvence	30Hz
Teplotní rozsah	-20°C až +120°C 0°C až +350°C +200°C až +650°C
Citlivost detektoru	0.05°C
Přesnost	±2°C

Nastavení hodnot na IČT kameře bylo shodné pro všechna měření, viz tab. 7.2.

Tabulka 7.2: Nastavené hodnoty na IČT kameře

Emisivita	0,96
Odražená teplota	20 °C
Atmosférická teplota	2,3 °C
Relativní vlhkost	50%
Vzdálenost	1 m

Údaje o použité termokameře

Termovizní kamera FLIR T335 spadá do střední třídy vybavenosti a výkonnosti. Rozlišení bolometru termokamery T335 je 320 x 240 pixelů, osahuje teplotní citlivosti 0,05°C při obnovovací frekvenci 30 Hz. Teplotní rozsah kamery lze nastavit do třech volitelných rozsahů -20°C až +120°C, 0°C až +350°C a +200°C až +650°C. [25]

Velkou předností této řady je velký 3.5“ LCD dotykový displej, laser pro přesné zaměření a stupeň krytí IP54 (ochrana proti stříkající vodě a prachu). Dále nabízí funkci obraz v obraze, kde dochází k propojení reálného snímku s termosnímkiem přímo v přístroji, zvukový záznam po dobu 60 vteřin, použití Extech přístrojů (např. klešťový ampérmetr) přes Bluetooth a integrovaný digitální fotoaparát 3,1Mpx s osvětlovací diodou. Tento model nabízí řadu vyhodnocovacích a měřících funkcí (až 5 bodů a 5 oblastí měření s MIN/MAX/průměr, izotermie či automatickou detekci teplých a studených bodů ve vybrané oblasti). [25]

Termokamery řady T nacházejí největší uplatnění při diagnostice a údržbě elektrických strojů a zařízení, rozvodů a rozveden elektrické energie, fotovoltaických panelů, transformátorů či elektrických zařízení. [25]

7.1.2 Výpočtová a vyhodnocovací zařízení

Pro výpočty reálné teploty jednotlivých komponent spalovacího motoru jsem použil systém FLIR QuickReport 1.2. Tento systém dodávaný společně s termokamerou FLIR T355 umožňuje upravovat nastavení emisivity, odražené teploty, atmosférické teploty, relativní vlhkosti a vzdálenosti, které jsou prvotně nastaveny na IČT kameře při měření. Po zadání reálných hodnot jednotlivých oblastí na termosnímku program zobrazí termogram se skutečnými teplotami.

Pomocí tohoto programu je možné termosnímek převést na pole pixelů (u této kamery pole 320x240 pixelů) a exportovat toto pole do programu Microsoft Excel, jednotlivým pixelům v poli program přiřadí teplotu odpovídajícího bodu.

Pro tuto funkci systému FLIR QuickReport 1.2 jsem vytvořil v programu Microsoft Excel výpočtový program, který je jako příloha na přiloženém CD.

7.1.3 Výpočtový program v Microsoft Excel

Tento program po zadání souřadnic pole vyhledá požadovanou oblast. Po zadání reálných parametrů emisivity, atmosférické teploty, odražené teploty a relativní vlhkosti vzduchu při měření program přepočítá požadované teplotní pole na reálné hodnoty a zobrazí je v grafu.

Použité vzorce pro přepočet teplot požadovaného pole

Pro výpočet jednotlivých teplot pole jsem použil vzorec na výpočet celkového zářivého toku (vzorec 5.2), který je popsán v kapitole 5.2, kde dosazené veličiny emisivity, atmosférické teploty, odražené teploty a relativní vlhkosti vzduchu jsou

hodnoty zadané do termokamery před měřením. Po výpočtu této veličiny program vypočte vlastní reálnou teplotu v jednotlivých bodech zadaného pole. Pro tento výpočet jsem použil vyjádření požadované teploty bodu vyjádřením této veličiny ze vzorce celkového zářivého toku, který pak vypadá následovně

$$T_{obj} = \sqrt[4]{\frac{\Phi_c}{\sigma} - (1-\varepsilon)\tau T_{refl}^4 - (1-\tau)T_{atm}^4} \quad (7.1)$$

Kde T_{obj} je požadovaná reálná teplota jednotlivých bodů, Φ_c je celkový zářivý tok, σ je Stefan–Boltzmannova konstanta, ε je emisivita měřeného povrchu, τ je propustnost atmosféry (relativní vlhkost), T_{refl} je odražená teplota a T_{atm} je teplota atmosféry. Každá z těchto veličin je reálnou hodnotou naměřenou senzory v laboratorní místnosti v době vlastních měření termokamerou (viz. tabulka 7.3).

Vypočtená teplota bodu je v Kelvinech, takže program ještě přepočte teplotu na stupně Celsia.

Tabulka 7.3: Reálné hodnoty při měření

Odražená teplota:	23.3°C
Atmosférická teplota:	27.1°C
Relativní vlhkost:	38.9%
vzdálenost:	1m

7.1.4 Určení emisivity povrchu

Emisivita je velmi důležitá veličina pro přesný výpočet teploty měřeného objektu, určit ji lze několika způsoby:

- Určíme ji odhadem materiálu a úpravy povrchu z tabulek emisivity (viz. kapitola 5.1.1).
- Použijeme speciální nástřík se známou emisivitou.
- Ohřejeme vzorek materiálu na známou teplotu, kterou můžeme určit velmi přesným dotykovým teploměrem (např. termočlánkem). Potom změříme teplotu tohoto tělesa infračerveným teploměrem. Měníme jeho emisivitu, dokud naměřená teplota neodpovídá teplotě změřené dotykovým teploměrem. [19]
- Při relativně nízké teplotě (do 260 °C) nalepíme na měřený objekt speciální plastovou samolepku se známou emisivitou. Infračerveným teploměrem změříme teplotu samolepky s touto emisivitou. Potom změříme povrchovou

teplotu měřeného objektu bez samolepky a přestavíme emisivitu tak, aby teploměr ukazoval správnou teplotu. [19]

- Do objektu, pokud je to možné, vyvrtáme otvor, jehož hloubka bude alespoň 6x větší než průměr. Průměr otvoru musí být větší než je průměr terče stanovený optikou termokamery pro danou vzdálenost (viz. kapitola 5.3). Při měření teploty v otvoru nastavíme emisivitu termokamery na hodnotu $\varepsilon = 1$. Podmínkou je, aby teplota v otvoru byla stejná jako na povrchu tělesa. [4]
- Emisivitu vzorku materiálu lze také změřit spektrometrem.

Pro svá měření jsem použil první dvě metody kde pro první jmenovanou což je odhadem materiálu a následné vyhledání emisivity v tabulkách bude zapotřebí ještě výpočet reálné teploty pomocí výpočtového programu jak je popsáno v předešlé kapitole 7.1.3. Pro druhou metodu což je nástřik speciální barvou se známou emisivitou poslouží jen program FLIR QuickReport 1.2, ve kterém, pokud mám všechny ostatní veličiny správně nastaveny, mohu přímo odečíst teplotu v oblasti nástřiku barvou. Pro nástřik byl použit ThermaSpray 800 černé barvy o odolnosti až do 800°C s danou emisivitou $\varepsilon = 0,96$.

7.2 Postup měření

Měření byla prováděna v laboratořích pístových spalovacích motorů Technické university v Liberci, kde měřeným objektem byl tříválcový řadový zážehový agregát Škoda 1,2 HTP 12V.

Při měření jsem postupoval následovně:

- Agregát jsme spustili a nechali zahřát na provozní teplotu, kde nám byla vodítkem teplota chladicí kapaliny zahřátá na přibližně 90°C.
- Mezitím jsem nastavil požadované hodnoty emisivity, odražené teploty, teploty atmosféry a relativní vlhkosti do termokamery (viz. tabulka 7.2).
- Termokamera se poté automaticky skalibrovala
- Po zahřátí agregátu jsme přistoupili k vlastnímu měření, kde jsme na předem definovanou vzdálenost po zaostření termokamerou fotili jednotlivé části motoru.
- Poté jsme agregát zastavili a nechali zchladnout na teplotu okolí.
- Po vychladnutí jsme aplikovali na různé povrchy agregátu speciální nástřik ThermaSpray 800, kde jsme postupovali podle návodu výrobce nástřiku.

- Nakonec jsme znovu spustili a zahřáli motor a celý postup měření na místech nástřiku opakovali.

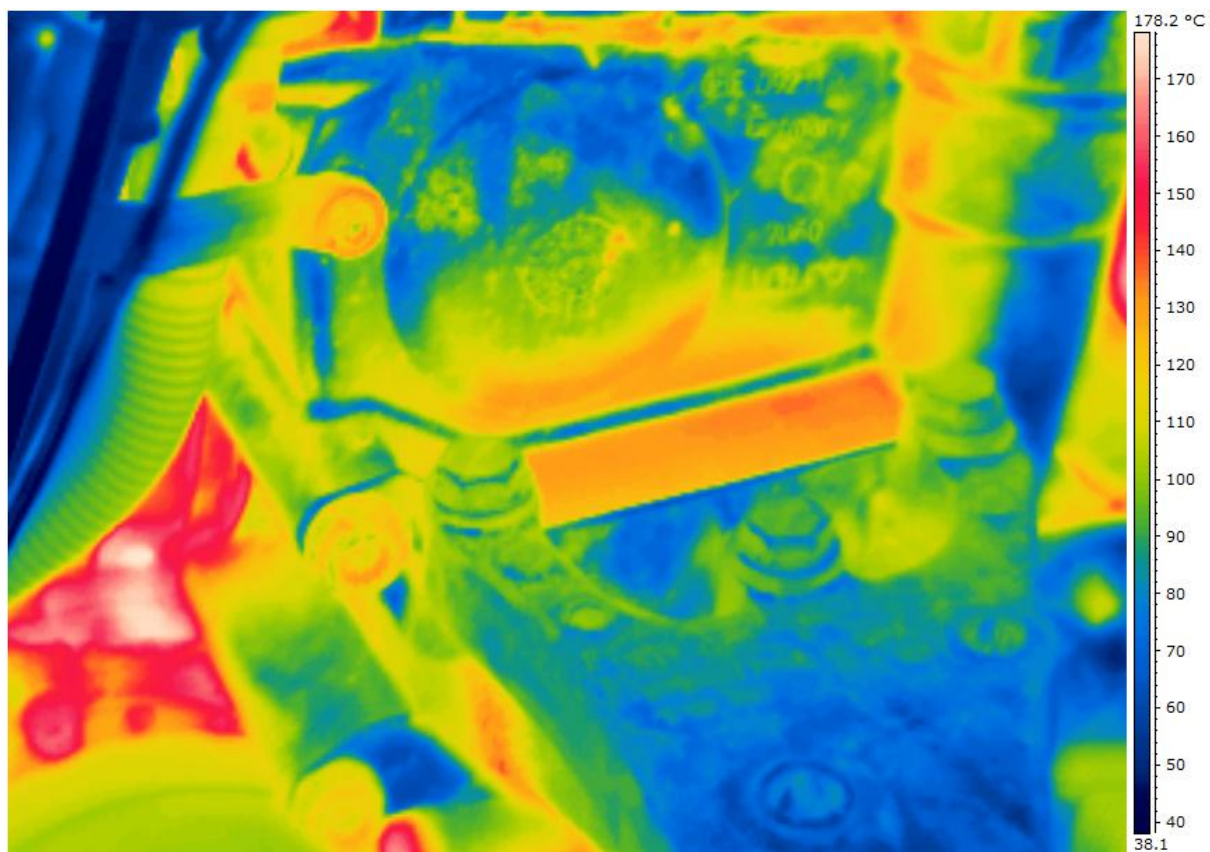
7.3 Porovnání termogramů

Na obrázku 7.2 vidíme termogram po zadání reálných hodnot atmosférické teploty, odražené teploty a relativní vlhkosti naměřených při focení termokamerou (viz. tabulka 7.3) a zvolenou emisivitou dle tabulek. Materiál jsem určil jako neleštěný hliník a v tabulkách vyhledal odpovídající hodnotu emisivity pro tento materiál což je $\varepsilon = 0,3$.

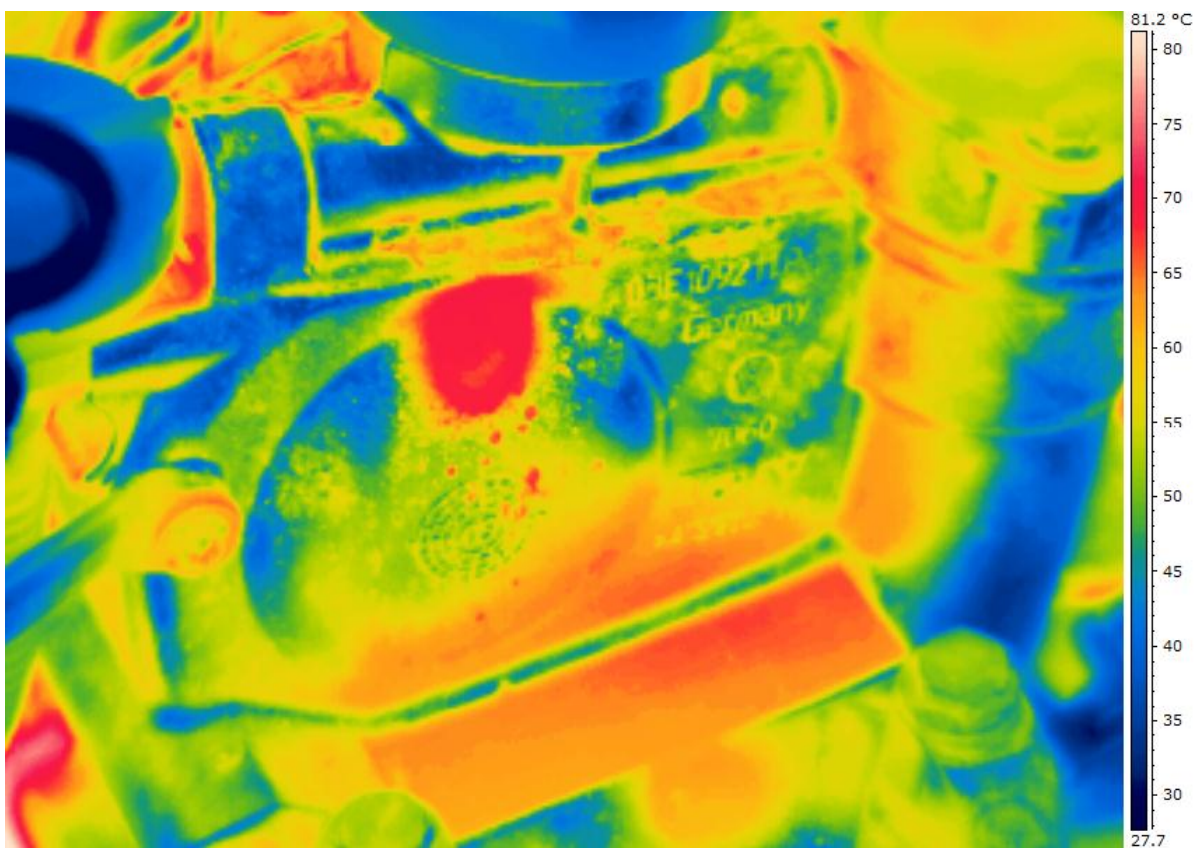
Na obrázku 7.3 je termogram kde je objekt opatřen speciálním nástřikem se známou emisivitou o hodnotě $\varepsilon = 0,96$, tudíž můžeme z termogramu rovnou vyčíst teplotu objektu v oblasti nástřiku.



Obrázek 7.1: Fotografie části hlavy motoru s použitým speciálním nástřikem



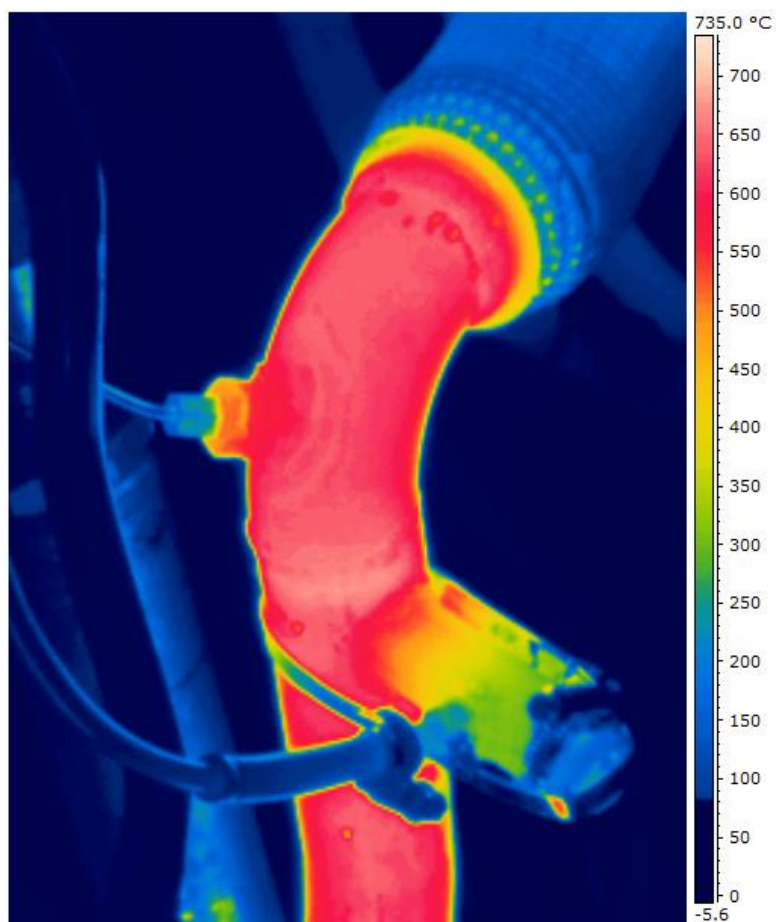
Obrázek 7.2: Termogram s reálnými hodnotami ($\epsilon = 0,3$)



Obrázek 7.3: Termogram s nástřikem speciální barvy ($\epsilon = 0,96$)



Obrázek 7.4: Výfukové potrubí za katalyzátorem



Obrázek 7.5: Termogram výfukového potrubí ($\varepsilon = 0,45$)

7.4 Zhodnocení měření

U termogramu na obrázku 7.2 můžeme odečítat pouze teploty v oblasti hliníkové hlavy válců, protože je jasné, že další komponenty na fotografii jsou vyrobeny z rozdílných materiálů s různou povrchovou úpravou, tudíž mají i jinou hodnotu emisivity.

Teplotu můžeme buď odečíst přibližně z tepelné škály umístěné vpravo u termogramu a v oblasti kde byl později umístěn speciální nástřik teplotu odhaduji na 80°C. Další možností je určení teplot pomocí výpočtů ve výpočtovém programu (viz. kapitola 7.1.3) kde teploty jednotlivých pixelů téže oblasti vycházeli podobně jako u předchozího odhadu.

Termogram na obrázku 7.3 se stejně jako u předešlého dá použít jen v určité oblasti a to v oblasti naneseného nástřiku protože emisivita v programu je nastavena na hodnotu $\varepsilon = 0,96$ nemůžeme teploty mimo tuto oblast brát jako reálné.

Jak si můžeme všimnout na tomto obrázku, nástřik na termogramu vytváří dojem, že v místě kde je nanesen se materiál zahřívá více, což je samozřejmě jen iluze, protože ostatní materiály mají nižší emisivitu než nástřik a tudíž jsou programem špatně přepočítány.

V oblasti nástřiku můžeme rovnou odečítat reálnou teplotu a ta je přibližně 70°C.

Jak z porovnání těchto metod vyplývá, jsou mezi teplotami na jednotlivých snímcích rozdíly, které mohou být způsobeny několika faktory:

- termokamera nebyla správně zaostřena;
- emisivita byla určena chybně;
- parametry veličin potřebných k měření termokamerou byly špatně naměřeny;
- chyba způsobena okolními zdroji tepla.

Pomocí obrázku 7.5 můžeme porovnat přesnost měření bezdotykového a dotykového měřidla. Výfukové potrubí za katalyzátorem jsme změřili pomocí termokamery a po odečtení z termogramu jsem určil teplotu okolo 650°C. to samé místo výfukového potrubí jsem změřil dotykovým měřidlem (jmenovitě termočlánekem), které naměřilo teplotu 641°C. V tomto případě bylo měření poměrně přesné

8 Závěr

Termografie si nachází široká využití například ve stavebnictví, zdravotnictví nebo v elektrotechnice. Její nespornou výhodou je snadná obsluha, ale hlavně okamžité zobrazení teplotní škály na displeji termokamery s možností dalšího zpracování pořízeného termogramu v přiloženém softwaru.

Kromě výhod má tato technologie samozřejmě i jisté nevýhody jako například vyšší pořizovací cena, ale hlavně prakticky nepoužitelnost pro přesné měření teploty. Teplotu samozřejmě změřit přesně jde, ale proces měření je velmi zdoluhavý a náročný, protože teplotu měříme nepřímou a tudíž musíme určovat a odměřovat veličiny potřebné pro její výpočet, což je dost složité jak jsem se přesvědčil při svém měření.

Pro přesné měření teploty bych doporučoval některou z dotykových měřidel. Odměřování je snadné, rychle a hlavně velmi přesné, protože se teplota měří přímo.

Využití termografie vidím spíš pro informativní účely, pokud chceme například zjistit v jakých místech se měřený objekt zahřívá nebo naopak chladne.

Literatura

- [1] TEPELNÁ ZAŘÍZENÍ. Podpora-techniky.cz [online]. [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://www.podpora-techniky.cz/page/tepelne-zareni>
- [2] PTÁČEK, Jan, JENČÍK, Josef, ČERNÝ, Miloš, BOROVIČKA, Milan a RAMERT, Bohumil. *Měření teploty v průmyslu (monografie) - 1.* 2 vyd. Praha: Dům techniky Praha, s.r.o., 1993, 616 s (1. a 2. díl)
- [3] TOPNÉ PANELE SUN OF HOPE. *Pohled fyziky* [online]. [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://sun-of-hope-topne-panely.sunofhope.cz/pohled-fyziky.pdf>
- [4] KREIDL, Marcel. *Měření teploty: senzory a měřicí obvody.* 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 239 s. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-730-0145
- [5] TERMOKAMERA.CZ. *Parametry termokamery* [online]. [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/parametry-termokamery/>
- [6] SUMARA, Jan. *Termografie v elektroenergetice.* Praha, 2012. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze
- [7] GYMOL.CZ. *SPEKTRUM ELEKTROMAGNETICKÉHO ZÁŘENÍ* [online]. [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: http://www.gymhol.cz/projekt/fyzika/11_elmag/11_elmag.htm
- [8] MARTIŠEK, FALTUSOVÁ: Matematika. *Stereometrie* [online]. [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: <http://www.zam.fme.vutbr.cz/~martisek/Vyuka%5CPrij%5Cskripta8.pdf>
- [9] WIKIPEDIA. *Absolutně černé těleso* [online]. [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Absolutně_černé_těleso
- [10] PAVELEK, Milan, JANOTKOVÁ, Eva a ŠTĚTINA, Josef. Vizualizační a optické měřicí metody: PLANCKŮV VYZAŘOVACÍ ZÁKON. In: [online]. 2. vyd. Vysoké učení technické v Brně, 2007 [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/0202.htm>
- [11] PAVELEK, Milan, JANOTKOVÁ, Eva a ŠTĚTINA, Josef. Vizualizační a optické měřicí metody: WIENŮV POSUNOVACÍ ZÁKON. In: [online]. 2. vyd. Vysoké učení technické v Brně, 2007 [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/0203.htm>

- [12] INFRA-PANELY.CZ. *Co jsou to infra panely: Elektromagnetické vlnění* [online]. [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: <http://www.infra-panely.cz/Menu-Nase-produkty-Co-jsou-to-infra-panely/147/>
- [13] PAVELEK, Milan, JANOTKOVÁ, Eva a ŠTĚTINA, Josef. Vizualizační a optické měřicí metody: STEFANŮV - BOLTZMANNŮV ZÁKON. In: [online]. 2. vyd. Vysoké učení technické v Brně, 2007 [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/0204.htm>
- [14] KUKLOVÁ, Jana. Historie termovizního měření. In: [online]. ČVUT v Praze, 2008 [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: http://www.fd.cvut.cz/projects/k611x1s/doc/works/termo_historie.pdf
- [15] TERMOKAMERA.CZ. *Konstrukce termokamery* [online]. [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/konstrukce-termokamery/>
- [16] TERMOKAMERA.CZ. *Chyby a omyly při měření termokamerou* [online]. [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/chyby-a-omyly-pri-mereni-termokamerou/>
- [17] VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. *Emisivita běžných materiálů* [online]. [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: http://www.fbi.vsb.cz/export/sites/fbi/030/.content/sys-cs/resource/PDF/TechnickaMereni/5_EmisivitaBeznychMaterialu.pdf
- [18] *Termokamera FLIR T33*. Wilsonville: FLIR Systems, Inc. 2011. Uživatelská příručka.
- [19] HUŠEK, Miloš. QTEST.CZ. *Bezdotykové teploměry: Bezdotykové měření teploty* [online]. 2009 [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: <http://www.qtest.cz/bezdotykovye-teplomery/bezdotykovye-mereni-teploty.htm>
- [20] BRYNDA, Petr. *Úvod do teorie termovizního měření* [online]. ČVUT v Praze [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: http://www.fd.cvut.cz/projects/k611x1s/doc/works/teorie_brynda.pdf
- [21] ARTEMIS. *Teplota a její měření* [online]. [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: http://artemis.osu.cz:8080/artemis/uploaded/199_3_3%20Teplota_mereni.pdf
- [22] VDOLEČEK, František. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. *Technická měření: Text pro podporu výuky v kombinovaném studiu* [online]. Brno: ČVUT, 2002 [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: <http://drogo.fme.vutbr.cz/opory/pdf/TM.pdf>
- [23] EAMOS.CZ. *Pístové spalovací motory* [online]. 2002 [cit. 2014-05-20]. Dostupné

z: http://eamos.pf.jcu.cz/amos/kat_fyz/modules/low/kurz_text.php?identifik=kat_fyz_7356_t&id_kurz=&id_kap=9&id_teach=&kod_kurzu=kat_fyz_7356&id_kap=9&id_set_test=&search=&kat=&startpos=2

- [24] BEROUN, Stanislav. TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. *Studijní texty k předmětu „Motorová vozidla“: Vozidlové motory* [online]. Liberec: TUL, 2005 [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: <http://www.kvm.tul.cz/studenti/texty/VOZMOT.pdf>
- [25] TERMOGRAM. *Termovizní kamery FLIR řady T* [online]. [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: [25] <http://www.termogram.cz/termovizni-kamera-flir-T335>

Přílohy

Příloha 1: Bakalářská práce v elektronické podobě na CD

Příloha 1:

Obsah přiloženého CD:

- Bakalářská práce v elektronické podobě ve formátu .pdf
- Termogramy, které nebyly použity v BP
- Výpočtový program pro Microsoft Excel ve formátu .xlsx